

**Труды Военно-космической
академии имени А.Ф. Можайского**
Научное рецензируемое издание
Выходит с 1942 года

Выпуск 667

2019 г.

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение
высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»
Министерства обороны Российской Федерации

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского
доктор техн. наук, профессор М.М. Пеньков

Члены редакционного совета:

С.В. Буг — заместитель начальника Михайловской военной артиллерийской академии
по учебной и научной работе *доктор пед. наук, проф.*;

В.П. Гаенко — главный научный сотрудник НИЦ БТС 12 ЦНИИ МО РФ
доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники;

А.М. Гончаров — начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности и технологического
сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) МО РФ *доктор воен. наук, проф.*;

М.А. Еремеев — профессор кафедры института комплексной безопасности и специального приборостроения
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» *доктор техн. наук, проф.*;

А.В. Кузичкин — заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт телевидения»
по информационным технологиям *доктор техн. наук, проф.*;

Б.В. Соколов — главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ;*

К.Г. Ставров — главный научный сотрудник научно-исследовательского океанографического центра
Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института *доктор техн. наук, проф.*;

А.В. Сержантов — заместитель начальника Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил
Российской Федерации по научной работе *доктор воен. наук, проф.*

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. Ю.В. Кулешов

Редколлегия:

председатель **Ю.В. Кулешов**, *доктор техн. наук, проф.*;

зам. председателя **И.В. Сахно**, *доктор техн. наук, проф.*;

ответственный секретарь **А.Л. Федер**, *кандидат техн. наук, доц.*;

Н.Ф. Аверкиев, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Ф. Алексеев**, *доктор техн. наук, доц.*;

Т.В. Алексеев, *доктор истор. наук, доц.*; **А.П. Алёшкин**, *доктор техн. наук, проф.*;

В.Н. Арсеньев, *доктор техн. наук, проф.*; **Д.Н. Бирюков**, *доктор техн. наук, доц.*;

И.А. Готюр, *доктор техн. наук, доц.*; **А.П. Доронин**, *доктор техн. наук, доц.*;

И.Ю. Еремеев, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Замарин**, *доктор техн. наук, проф.*;

В.Н. Калинин, *доктор техн. наук, проф.*; **Б.Д. Казахов**, *доктор воен. наук, проф.*;

В.В. Клейменов, *доктор техн. наук, проф.*; **В.В. Козлов**, *доктор техн. наук, проф.*;

Н.С. Кужекин, *кандидат филос. наук, проф.*; **В.Н. Кузьмин**, *доктор воен. наук, проф.*;

Н.Б. Кунтурова, *доктор пед. наук, доц.*; **Е.Л. Лебедев**, *доктор техн. наук, проф.*;

А.Г. Ломако, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Лоскутов**, *доктор техн. наук, проф.*;

Г.Н. Мальцев, *доктор техн. наук, проф.*; **Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук;*

А.Н. Павлов, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Паршуткин**, *доктор техн. наук, проф.*;

Н.А. Репях, *кандидат филос. наук, доц.*; **А.М. Сычева**, *доктор техн. наук, проф.*;

И.В. Фоминов, *доктор техн. наук*; **А.В. Харченко**, *доктор техн. наук, доц.*;

К.Ю. Цветков, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Чарушников**, *доктор воен. наук, проф.*

Издание зарегистрировано
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.
Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).
Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Ответственный за выпуск:
начальник РИО **С.В. Чернышев**

Выпускающий редактор: *А.В. Головина*
Технический редактор
и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*
Редакторы:
Е.Е. Лавриенко, Е.И. Леончук,
Г.В. Паниковских

Техническая поддержка:
Т.Н. Румянцева

Адрес:
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;
тел.: 8 (812) 347-97-69;
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 28.06.2019.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 116,00. Уч.-изд. л. 57,50
Тираж 50 экз. Заказ 3737/71.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Авксентьев А.А., Иванов А.О., Исупов Н.А.</i> Метод расчета управления для сближения космического аппарата с орбитальным объектом за минимальное число витков	8
<i>Бурмистров В.В., Зоткин М.Ю., Макаров М.М., Миронов В.И.</i> Методика аналитического оценивания точности наведения космического аппарата-робота при итерационном терминальном управлении в условиях действия случайных возмущений.....	16
<i>Джумков В.В., Петушков А.М., Черный С.Э.</i> Методический подход к оцениванию эффективности научной деятельности научно-исследовательских организаций Министерства обороны Российской Федерации	26
<i>Зыков Д.Д., Махонько В.П., Спесивцев А.Б., Шувалов Д.В.</i> Обоснование мер по совершенствованию транспортного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации на основе спутникового мониторинга инфраструктуры железнодорожного транспорта и воинских перевозок	35

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

<i>Алёшкин А.П., Бакурский К.В., Невзоров В.И., Савочкин П.В.</i> Методы компенсации искажений волнового фронта при оптимизации характеристик фазированной антенной решетки радиолокационных средств	43
<i>Благодыренко Е.В., Назаров А.В.</i> Имитационное моделирование процесса распознавания характеристик космического аппарата на основе многомерного представления и распознавания его спектрофотометрического портрета ...	52
<i>Благодыренко Е.В., Назаров А.В.</i> Комбинаторно-метрический алгоритм распознавания многомерных групповых точечных объектов в иерархическом пространстве признаков фотометрических реализаций	60
<i>Бурлаков С.О., Таранущенко А.П., Шадрин А.Г.</i> Оптимизация справедливой дисциплины обслуживания IP-пакетов в маршрутизаторе	69
<i>Витензон К.И., Вышинский А.П., Колесник А.В.</i> Методика оценивания структурной устойчивости системы спутниковой связи с учетом важности передаваемой информации	74

<i>Вышинский А.П., Колесник А.В., Халиков Э.М., Чарушников А.В.</i> Направления внедрения технологий моделирования космических систем и средств в комплексах средств автоматизации центров управления Вооруженных Сил Российской Федерации	80
<i>Звонарев В.В., Ковальский А.А., Попов А.С., Пряхин В.А., Шерстюк А.В.</i> Методика расчета достоверности приема сообщения в спутниковом радиоканале связи с малыми углами визирования при воздействии незамирающей помехи	87
<i>Коваленко А.Ю., Коваленко Е.Л., Терещенко С.В.</i> Методика организации информационно-навигационного обеспечения потребителей морского флота в Арктической зоне Российской Федерации	95
<i>Козинов И.А., Леошко А.А.</i> Адаптивный выбор алгоритмов сжатия и формирования сигнально-кодowych конструкций для оперативной передачи видеоданных дистанционного зондирования Земли по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью	100
<i>Кузнецов В.И.</i> Обоснование метода решения задачи автономного определения параметров движения космических аппаратов на основе взаимной обработки результатов измерений пульсарных излучений	110
<i>Лихачев В.М., Проданец В.А.</i> Коротковолновая лучевая асимптотика в задачах дифракции электромагнитных волн в угловых областях	122
<i>Ставцев Б.С.</i> Проверка способа снижения уровня боковых лепестков для рупорной сверхширокополосной антенны, используемой в радиолокаторах военного назначения	133
<i>Якимов В.Л.</i> Планирование операций информационно-телеметрического обеспечения управления космическими аппаратами с высоким уровнем автономности на основе нелинейных моделей изменения параметров бортовой аппаратуры	141
СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
<i>Абакумов А.Н., Босый А.С., Еремеев И.Ю., Передрий А.В.</i> Метод кластеризации временных посылок в пространстве неэнергетических параметров на основе аппроксимации опорной траектории с целью декомпозиции группового сигнала множественного доступа с временным разделением	152
<i>Босый А.С., Еремеев И.Ю., Овчаренко К.Л., Тюстин М.М., Шиловский Е.Ю.</i> Метод определения местоположения земных станций по ретранслированным сигналам в условиях неопределенности координат космического аппарата-ретранслятора с применением беспилотного летательного аппарата ...	161
<i>Сазонов К.В., Татарка М.В., Шуваев Ф.Л.</i> Модель представления последовательностей событий на базе вероятностных суффиксных деревьев	170

<i>Чувиров А.А.</i> Способ контактного зондирования атмосферы в неосвещенных в метеорологическом отношении районах	176
--	-----

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Гнидко К.О., Единархова А.О., Макаров С.А., Сергеев А.С.</i> Анализ угроз когнитивных искажений информационно-психологического объекта контроля	186
--	-----

<i>Данилов В.В., Якунин В.И.</i> Аппроксимационный подход к выявлению зараженных вредоносным программным обеспечением хостов на основе параметрического анализа DNS-операций	200
--	-----

<i>Зима В.М., Крюков Р.О.</i> Методика формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в автоматизированных системах специального назначения	213
---	-----

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

<i>Бродский М.С., Витензон К.И., Проценко П.А., Янов С.В.</i> Методика планирования применения средств радиоконтроля функционирования космических аппаратов связи	224
---	-----

<i>Власов С.А., Кубасов И.Ю.</i> Расчет структур орбитальных группировок космических аппаратов глобального непрерывного обзора поверхности Земли, оснащенных радиолокационными комплексами	235
--	-----

<i>Иванов А.О., Котяшов Е.В., Чарушиников А.В., Чернявский В.А.</i> Моделирование защитного маневрирования космического аппарата для парирования опасных сближений с объектами космического мусора на геостационарной орбите	243
--	-----

<i>Зыков Д.Д., Исупов А.А., Крупский К.А.</i> Методика обоснования состава средств траекторных измерений полигонного измерительного комплекса под заданный сценарий проведения натурного эксперимента	248
---	-----

РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

<i>Бабин А.М., Гончаров П.С., Житный М.В., Зозуля Л.П.</i> Математическая модель движения космического аппарата при соударении с частицей в космическом пространстве	254
--	-----

<i>Бурмистров В.В., Зоткин М.Ю., Ричняк А.М.</i> Анализ вариантов конструктивного исполнения сверхпроводящих магнитных исполнительных органов систем ориентации и стабилизации малых космических аппаратов	259
--	-----

<i>Гурьев И.С., Лабецкий П.В., Немиров А.В.</i> Применение средств измерений магнитного поля для поиска объектов в околоземном пространстве	267
<i>Власов В.А., Горбулин В.И., Каргу Д.Л., Радионов Н.В., Шубин Д.А.</i> Методика оценивания степени частичного затенения панелей солнечных батарей элементами конструкции космического аппарата дистанционного зондирования Земли	272
<i>Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Кудрявцев Г.И., Чирва С.В.</i> Концепция адаптивного управления жизненным циклом объектов ракетно-космической техники на основе интеллектуальных систем	279
<i>Демин А.П., Ершов Д.С., Кульков А.В.</i> Алгоритм распределения поверочного оборудования метрологических подразделений радиотехнических полков при осуществлении мероприятий метрологического обеспечения войск (сил) в условиях боевых действий.....	290
<i>Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Тришункин В.В.</i> Методика обоснования системы поставки запасных частей комплексов вооружения	297
<i>Казанцев Д.И., Карытко А.А., Родионов Э.А.</i> Методика тестирования производительности вычислительных систем, развернутых на основе технологий виртуализации	309
<i>Калмыков Е.В.</i> Подход к разработке модели подсистемы поддержания в готовности электромеханического оборудования объектов космических войск	320
<i>Козлов В.В., Кукушкин И.О., Лагун А.В., Слатов В.Л.</i> Метод структуризации системы показателей свойств ракетно-космического комплекса	327
<i>Крыжановский В.И., Щербаков В.И.</i> Математическая модель двухконтурной следящей системы для наведения на цель оптико-электронного прибора	337
<i>Калабин П.В., Кузьмичев Ю.А., Шабалатов А.С.</i> Метод изменения динамических характеристик системы «рулевой привод – камера двигателя»	346
<i>Мальцев Г.Н., Склемин Д.В.</i> Определение параметра закона распределения времени безотказной работы унифицированных радиоэлектронных систем по цензурированной выборке данных об отказах	352
<i>Зиновьев К.Г., Сасункевич А.А., Силантьев С.Б.</i> Оценивание времени нахождения космического аппарата в зоне радиовидимости наземного радиотехнического средства	361
<i>Алуев С.В., Каргу Д.Л., Радионов Н.В., Стеганов Г.Б., Шубин Д.А.</i> Разработка алгоритма построения вольт-амперных характеристик солнечных батарей космического аппарата дистанционного зондирования Земли при наличии частичного затенения	369

ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК

<i>Алексашов В.Ю., Завьялова Г.М, Лебедев Е.Л.</i> Детерминанты выбора инновационных программных комплексов для разработки электронных образовательных средств	377
<i>Багрецов С.А., Молдованова С.М.</i> Методика распределения кандидатов по профилям специализаций в научных и образовательных подразделениях вуза	386
<i>Багрецов С.А., Молдованова С.М.</i> Методика определения необходимого числа кандидатов в системе подготовки научных кадров (кадров высшей квалификации), соответствующих требованиям формируемых научных направлений в вузе	393
<i>Багрецов С.А, Черная Т.Э.</i> Модель трансформационного процесса индивидуально-группового обучения в вузе	400
<i>Богук Ю.М., Голубев М.А, Ставицкий Д.В., Фетисов А.В.</i> Моделирование процесса формирования компетенций у выпускников военно-учебных заведений	410

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

<i>Гуторович О.В., Ковалёв А.П., Латанов В.М.</i> Становление и развитие космических частей как составной части Вооруженных Сил СССР и Российской Федерации (1981–1992)	418
<i>Селихина Н.В., Терещук С.С.</i> Юридическая ответственность военнослужащих за непринятие мер по предотвращению и урегулированию конфликта интересов (проблемы и противоречия правоприменения)	426
Рефераты статей	432
Сведения об авторах	447
Сведения о рецензентах	458

А.А. Авксентьев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.О. Иванов,
кандидат техн. наук;
Н.А. Исупов

МЕТОД РАСЧЕТА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СБЛИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ОРБИТАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ ЗА МИНИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО ВИТКОВ

Метод предназначен для расчета управляющих параметров, обеспечивающих сближение центров масс космического аппарата и орбитального объекта, двигающихся в окрестности одной и той же круговой орбиты. В начальный момент времени рассматриваемые объекты находятся на значительном расстоянии друг от друга. Для центрального поля тяготения рассчитывается величина импульса скорости, обеспечивающего сближение через минимально возможное число витков. С использованием величины рассчитанного импульса моделируется движение рассматриваемых объектов в условиях нормального поля тяготения, интервальной работы двигательной установки и с учетом продолжительности разворотов космического аппарата. Получающийся промах уменьшается с помощью разработанного метода ближнего наведения.

Ключевые слова: космический аппарат, орбитальный объект, сближение, круговая орбита, целое число витков.

ВВЕДЕНИЕ

При необходимости сближения с орбитальным объектом (ОО) космический аппарат (КА) с помощью ракеты космического назначения выводится в его окрестность. Момент старта ракеты выбирается таким, чтобы выведение происходило вблизи плоскости целевой орбиты и заканчивалось в окрестности одной из ее ячеек, в общем случае не совпадающей с ячейкой ОО. Орбиты большинства ОО являются близкими к круговым. Такими являются орбиты навигационных спутников, орбитальных станций и геостационарных КА. Поэтому на практике нередко встречаются случаи сближения объектов, находящихся в различных ячейках одной и той же круговой орбиты.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СБЛИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ОРБИТАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ ЗА МИНИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО ВИТКОВ

Пусть пассивный ОО и активный КА движутся по круговой околоземной орбите радиуса R_0 . В начальный момент времени КА находится сзади от ОО на угловом расстоянии $\Delta\theta_0$, как показано на рис. 1.

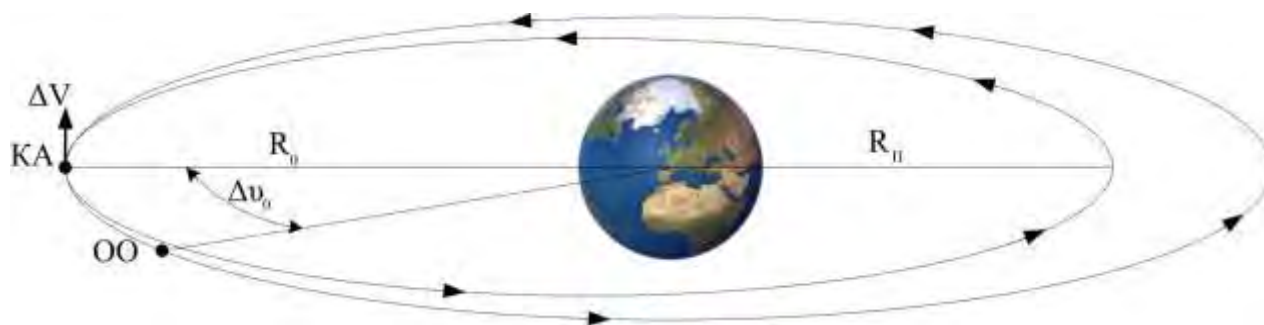


Рис. 1. Начальное положение и схема сближения КА с ОО

Движение центров масс КА и ОО описывается с учетом следующих уравнений и допущений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mathbf{V}_{\text{КА}}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{R}_{\text{КА}}) + \mathbf{W}_{\text{КА}}; \\ \frac{d\mathbf{R}_{\text{КА}}}{dt} = \mathbf{V}_{\text{КА}}; \\ \frac{d\mathbf{V}_{\text{ОО}}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{R}_{\text{ОО}}); \\ \frac{d\mathbf{R}_{\text{ОО}}}{dt} = \mathbf{V}_{\text{ОО}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_{\text{КА}}, \mathbf{V}_{\text{ОО}}$ – векторы скоростей КА и ОО;

$\mathbf{R}_{\text{КА}}, \mathbf{R}_{\text{ОО}}$ – радиусы-векторы КА и ОО;

$\mathbf{g}(\mathbf{R}_{\text{КА}}), \mathbf{g}(\mathbf{R}_{\text{ОО}})$ – векторы гравитационных ускорений КА и ОО, рассчитываемые в соответствии с моделью нормального поля тяготения [1]. Модель учитывает центральную составляющую и две составляющие от полярного сжатия Земли;

$\mathbf{W}_{\text{КА}}$ – вектор ускорения КА от двигательной установки, модуль которого $|\mathbf{W}_{\text{КА}}| = W_{\text{max}} \vee 0$. Запас характеристической скорости составляет ΔV_{max} .

t – время, $t \in [0, t_k]$.

Изменение направления $\mathbf{W}_{\text{КА}}$ производится путем разворотов корпуса КА, поскольку двигательная установка (ДУ) неподвижна относительно корпуса. Вращение КА описывается динамическими уравнениями Эйлера [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y)\omega_y\omega_z = M_x; \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z)\omega_z\omega_x = M_y; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x)\omega_x\omega_y = M_z, \end{array} \right. \quad (2)$$

где J_x, J_y, J_z – моменты инерции КА относительно осей ox, oy, oz связанной с аппаратом системы координат;

$\frac{d\omega_x}{dt}, \frac{d\omega_y}{dt}, \frac{d\omega_z}{dt}$ – проекции вектора углового ускорения КА на связанные с ним оси;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости КА на связанные оси;

M_x, M_y, M_z – проекции вектора управляющего момента сил на оси ox, oy, oz , причем

$$\begin{aligned} M_x &\in [-M_{x \text{ max}}, M_{x \text{ max}}]; & M_y &\in [-M_{y \text{ max}}, M_{y \text{ max}}]; \\ M_z &\in [-M_{z \text{ max}}, M_{z \text{ max}}], \end{aligned} \quad (3)$$

где $M_{x \text{ max}}, M_{y \text{ max}}, M_{z \text{ max}}$ – модули максимальных моментов сил, развиваемых исполнительными органами КА.

Необходимо разработать управление, обеспечивающее мягкое сближение КА с ОО за минимально возможное число витков по орбите, а также рассчитать продолжительность и расход характеристической скорости на сближение.

Мягкое сближение в данной задаче означает уменьшение относительного расстояния и относительной скорости между рассматриваемыми объектами до величин, не превышающих 1 м и 1 м/с соответственно.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Управление, обеспечивающее мягкое сближение КА с ОО и выполнение всех условий поставленной задачи, состоит из управлений на участках дальнего и ближнего наведения. На участке дальнего наведения управление заключается в придании КА дополнительной скорости, не превышающей по модулю ΔV_{\max} и обеспечивающей сближение с ОО через минимально возможное число витков.

Сначала для движения в центральном поле тяготения рассчитывается величина импульса скорости, обеспечивающего жесткое сближение с ОО через n витков. Одновитковое сближение КА с ОО схематически показано на рис. 1.

В соответствии с третьим законом Кеплера период обращения ОО вокруг Земли составляет

$$T_{00} = 2\pi \sqrt{\frac{R_{00}^3}{\mu}},$$

где μ – гравитационная постоянная Земли.

Орбитальная скорость вращения ОО:

$$\omega_{00} = \frac{2\pi}{T_{00}} = \sqrt{\frac{\mu}{R_{00}^3}}.$$

Моменты времени прохождения ОО через точку, в которой КА сообщается импульс скорости, вычисляются по формуле

$$t_{00n} = \frac{2\pi n - \Delta\vartheta}{\omega_{00}} = (2\pi n - \Delta\vartheta) \sqrt{\frac{R_{00}^3}{\mu}} \quad (4)$$

где n – число витков, через которое КА сблизится с ОО, $n=1, 2, \dots$.

Рассчитаем моменты времени, в которые после сообщения импульса скорости КА будет проходить через точку возможной встречи с ОО. На рис.1 эта точка показана как точка приложения импульса скорости ΔV . Линейная скорость КА до сообщения импульса скорости ΔV определяется по формуле

$$V_{KA0} = \frac{2\pi R_{00}}{T_{00}} = \sqrt{\frac{\mu}{R_{00}}} \quad (5)$$

После сообщения импульса ΔV КА переходит на новую орбиту с радиусом в апогее R_{00} и с радиусом в перигее R_{Π} , для расчета которого используется известное соотношение [1]

$$V_{KA0} - \Delta V = \sqrt{2\mu} \sqrt{\frac{R_{\Pi}}{R_{00}(R_{00} + R_{\Pi})}} \quad (6)$$

Из уравнения (6) с учетом выражения (5) получается следующее значение:

$$R_{\Pi} = \frac{R_{00}^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2R_{00}}} - \frac{\Delta V}{\sqrt{2\mu}} \right)^2}{1 - R_{00} \left(\sqrt{\frac{1}{2R_{00}}} - \frac{\Delta V}{\sqrt{2\mu}} \right)^2} \quad (7)$$

В соответствии с законом Кеплера период обращения КА по орбите составляет

$$T_{КА} = \pi \sqrt{\frac{(R_{00} + R_{\Pi})^3}{2\mu}},$$

и моменты времени прохождения КА через точку, в которой планируется встреча КА с ОО, определяются выражением

$$t_{КАm} = \pi m \sqrt{\frac{(R_{00} + R_{\Pi})^3}{2\mu}}, m = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Для сближения необходимо обеспечить равенство моментов времени прохождения орбитальным объектом и космическим аппаратом заданной точки встречи.

Пусть сближение планируется осуществить в ближайший по времени пролет через точку выдачи импульса ($n=1$). Тогда ΔV следует рассчитать таким, чтобы за оставшуюся часть витка полета ОО космический аппарат сделал один оборот ($m=1$) по орбите фазирования. Если же КА до сближения с ОО сделает большее число оборотов ($m>1$), то по сравнению со случаем, когда $m=1$, сближение раньше не произойдет, но увеличится расход энергии, так как потребуются более значительное уменьшение радиуса перигея. Сказанное означает, что сближение за $m>n$ витков нежелательно, к тому же противоречит требованию обеспечить сближение за минимальное число витков. Выбор значения $m<n$ тоже не имеет смысла, поскольку на предыдущем витке объекты не сблизились.

Если сближение планируется осуществить через два витка ($n=2$), то аналогичные рассуждения приводят к выводу о нежелательности выбора значения $m>n$. Такой выбор лишь увеличивает расход энергии и не ускоряет сближение. Изменение m в сторону меньших по отношению к n значений производится путем увеличения радиуса перигея орбиты фазирования. При этом увеличиваются затраты энергии, но сближение не ускоряется. Поэтому выбор величины $m<n$ так же, как и выбор значения $m>n$, является нежелательным.

Изложенные рассуждения приводят к выводу о том, что при решении поставленной задачи целесообразно и достаточно рассмотреть лишь одно соотношение значений числа витков: $m=n$. Приравнявая правые части уравнений (4) и (8) с учетом значения (7) и равенства $m=n$, получаем следующее выражение:

$$\Delta V_n = \sqrt{\frac{\mu}{R_{00}}} \left(1 - \sqrt{2 - \frac{1}{\sqrt[3]{1 - \frac{\Delta \vartheta^0}{\pi n} + \frac{\Delta \vartheta^2}{4\pi^2 n^2}}}} \right), n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Входящее в уравнение (9) число витков n является свободным параметром и мощным инструментом изменения продолжительности сближения. При отсутствии ограничений на про-

должительность соответствующий выбор величины n позволяет выполнить любые требования по расходу характеристической скорости на сближение. С увеличением n расход асимптотически приближается к нулю, а время сближения – к бесконечности. С уменьшением n расход увеличивается, а время сближения уменьшается. При одновитковом сближении наблюдается минимум по продолжительности и максимум по расходу характеристической скорости для всех рассматриваемых траекторий, которыми являются траектории сближения с целым числом витков после сообщения КА импульса скорости ΔV_n .

По формуле (9) для $n = 1, \dots, 10$ получены значения ΔV_n , которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модули импульсов скорости для сближения КА с ОО через n витков

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta V_n, \text{ м/с}$	128,29	60,32	39,43	29,29	23,30	19,34	16,54	14,44	12,81	11,52

Значение, получаемое по формуле (9), является приближенным значением параметра, определяющего условие выключения двигательной установки. Для его уточнения используется математическая модель, в которой параметры движения КА и ОО рассчитываются с учетом допущений, сформулированных в постановочной части задачи.

Применяемый метод управления вращением КА изложен в работе [3], где показано, что для обеспечения максимального быстродействия плоский разворот должен выполняться со скоростью

$$\omega_{\text{тр}} = \sqrt{2 \frac{d\omega_{\gamma \text{ max}}}{dt} \gamma},$$

где $\frac{d\omega_{\gamma \text{ max}}}{dt}$ – максимальное по модулю ускорение, которое исполнительные органы КА способны развить в направлении разворота. Алгоритм расчета максимального ускорения, обеспечивающий выполнение условий (3), описан в работе [4];

γ – угол разворота.

Управление вращательным движением является экстенсивным и обеспечивает скорейший выход на разворот по кратчайшему пути от текущего до требуемого направления оси ДУ. При этом требуемое направление рассчитывается в результате работы алгоритма управления движением центра масс.

Применение метода начинается с расчета приращения скорости ΔV_1 по формуле (9) при значении $n = 1$, обеспечивающей одновитковое сближение с ОО. Если полученное значение $\Delta V_1 \leq \Delta V_{\text{max}}$, то оно используется при моделировании. В результате моделирования получается более точная и существенно отличающаяся от ΔV_1 величина общего расхода скорости. Если она превышает ΔV_{max} , то n увеличивается на единицу и рассчитывается ΔV_2 для двухвиткового сближения. Если получающаяся для двухвиткового сближения величина общего расхода скорости превышает ΔV_{max} , то число витков увеличивается еще на единицу. Процесс продолжается до тех пор, пока рассчитанное значение ΔV_n , где n – число витков, не станет приводить к допустимому общему расходу скорости.

Если КА в начальный момент времени опережает ОО, то моделируется увеличение скорости КА на величину ΔV_n под действием ускорения W_{max} . Если же КА в начальный момент отстает от ОО, то моделируется уменьшение скорости КА с замедлением W_{max} .

Поскольку сближение моделируется в условиях, отличающихся от условий, для которых рассчитывается импульс скорости, то КА промахивается относительно ОО. Получающийся промах может быть уменьшен как путем изменения модуля, так и с помощью изменения направления, в котором прикладывается ускорение W_{\max} . В качестве основных могут быть рассмотрены три направления, по которым прикладывается ускорение W_{\max} : в соответствии с текущим трансверсальным направлением, с текущим направлением скорости КА и с направлением скорости в начальной точке маневра. Лучшим из направлений является то, которое обеспечивает сближение на меньшее расстояние до ОО. Результаты сравнения излагаются в следующей части данной статьи.

Ни одно из указанных направлений приложения W_{\max} , как правило, не приводит к сближению до требуемого относительного расстояния. По возможностям уменьшения относительного расстояния и относительной скорости их превосходит разработанный метод ближнего наведения. Переход от дальнего наведения к ближнему производится при сближении КА с ОО на достаточно малое расстояние $R_{\text{БН}}$.

Используемый метод ближнего наведения изложен в работе [5]. В ней доказано, что для оптимального по времени мягкого сближения модуль относительной скорости должен приближаться к значению

$$V_{\text{опт}} = \sqrt{2W_{\max}R}, \quad (10)$$

где R – расстояние от КА до ОО.

Направление вектора $V_{\text{опт}}$ определяется направлением линии визирования. Для приближения вектора относительной скорости V к вектору $V_{\text{опт}}$ ось ДУ должна направляться по вектору $V_{\text{доб}}$, который равен разности $V_{\text{опт}}$ и текущей относительной скорости V . Геометрическая сущность расчета $V_{\text{доб}}$ поясняется с помощью схемы, изображенной на рис. 2.

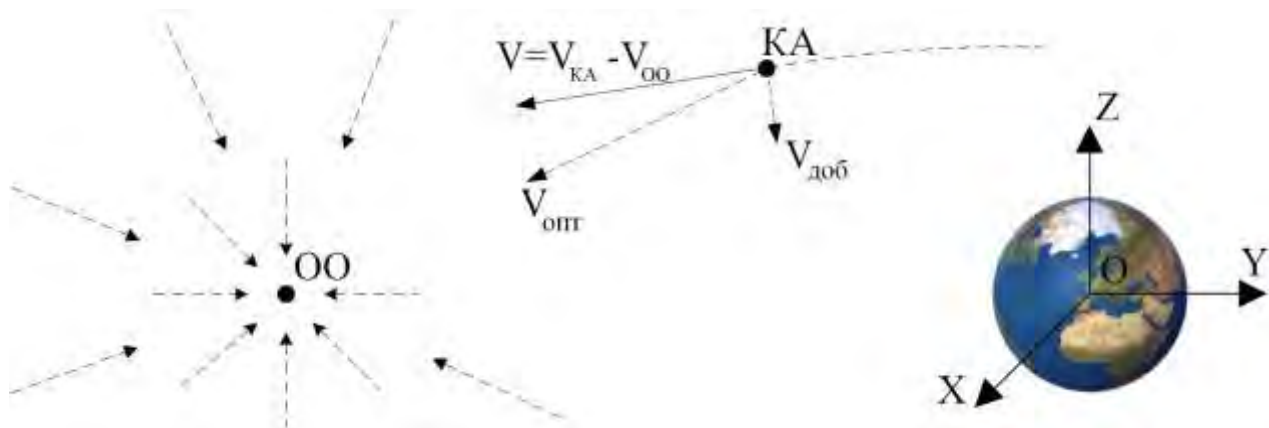


Рис. 2. Схема ближнего наведения

На рис. 2 пунктирными стрелками показаны требуемые направления векторов $V_{\text{опт}}$. Они обеспечивают сближение без промахов с различных ракурсов. Если при этом модуль вектора относительной скорости выдерживается равным $V_{\text{опт}}$ и определяется в соответствии с соотношением (10), то сближение будет мягким, реализуемым и оптимальным по быстродействию.

Расчеты проведены при следующих значениях входящих в уравнения (1) – (10) величин:

$$R_{00} = 42\,164\,200 \text{ м}; \quad \Delta\vartheta_0 = 40^0; \quad W_{\max} = 0,08 \text{ м/с}^2; \quad J_x = 60 \text{ кг·м}^2; \quad J_y = J_z = 120 \text{ кг·м}^2; \\ M_{x \max} = M_{y \max} = M_{z \max} = 0,6 \text{ Н·м}; \quad \mu = 3,986004418 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2; \quad \pi = 3,141592654.$$

Исследованы возможности использования получаемых по формуле (9) значений для решения поставленной задачи. В качестве примера рассмотрено одновитковое сближение с использованием величины 128,29 м/с в качестве значения модуля приращения скорости, при достижении которого двигательная установка КА выключается и начинается показанный на рис.1 пассивный участок дальнего наведения.

Приращение скорости моделировалось с последовательным использованием трех опорных направлений. В первом случае тяга ДУ направлялась против текущего вектора скорости, во втором – против текущего трансверсального направления, и в третьем – против начального трансверсального направления. Минимальные расстояния, на которые КА при отсутствии возмущений приблизился к ОО через виток, составили 36,9 км, 36,0 км и 240,0 км соответственно. Такие значения являются неприемлемыми, и требуется принимать меры для их уменьшения.

Исследована возможность уменьшения минимального расстояния, на которое КА приблизился к ОО, за счет изменения полученного по формуле (9) значения скорости. Путем направленных переборов с уменьшающимся шагом получены следующие результаты. Для первого случая – модуль приращения скорости 127,94 м/с и минимальное расстояние 34,0 км. Для второго – 127,1 м/с и 32,7 км. Для третьего – 131,0 м/с и 0,04 км соответственно. Результаты пошаговых итераций для третьего случая показаны на рис. 3.

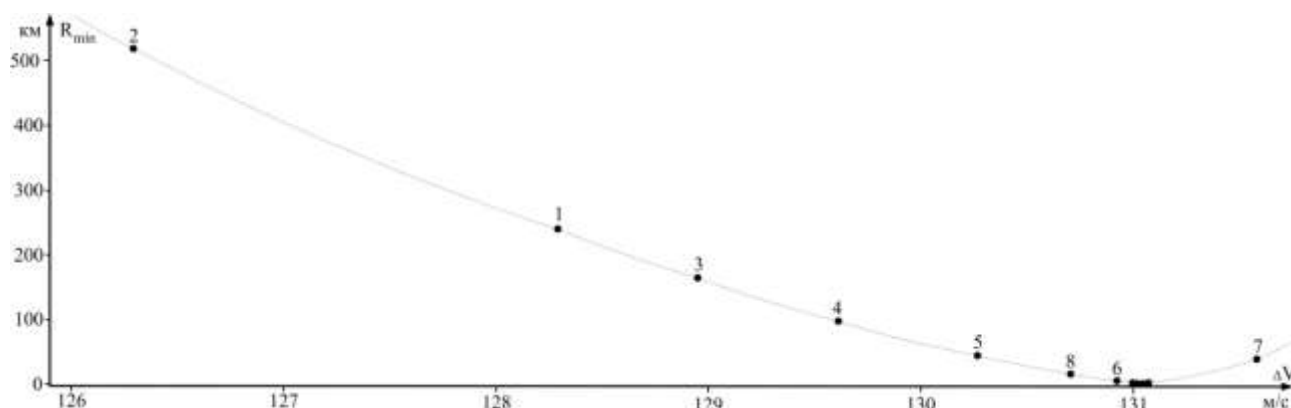


Рис. 3. Результаты уточнений величины приращения скорости ΔV

В результате 19 итераций (на рис. 3 пронумерованы первые 8 из них) через 11 мин вычислений с использованием процессора, имеющего тактовую частоту 3,3 ГГц, получено ΔV , приводящее к промаху величиной 40 м. Полученный результат не является решением поставленной задачи.

Приемлемым способом уменьшения конечного промаха по координатам и скоростям следует считать использование на конечном участке сближения метода ближнего наведения, описанного в данной статье. Возможности метода исследовались в условиях периодического получения информации, а также одновременного действия следующих ошибок и возмущений:

- выделения ОО на фоне других объектов при относительном расстоянии, не превышающем 30 км, с периодичностью 10 с и среднеквадратической ошибкой (СКО) по направлению 3,0 угл. мин. Выделение становится невозможным при угловых расстояниях 40^0 и 12^0 от ОО до Солнца и Луны соответственно;

- уточнения параметров движения КА по сигналам навигационной системы с СКО 10 м по расстоянию, 2 см/с по скорости и с периодичностью 0,1 с;

- уточнения параметров движения ОО с СКО 10 м по расстоянию, 2 см/с по скорости и с периодичностью 8 ч.;
- перекоса направления тяги ДУ КА относительно продольной оси ox , составляющего 2^0 ;
- момента силы от эксцентриситета тяги ДУ КА величиной 0,1 Нм;
- систематической не обнаруживаемой при калибровке акселерометра ошибки измерений по оси ox , составляющей $1,0 \cdot 10^{-4}$ м/с², а по осям oy и oz – $1,0 \cdot 10^{-5}$ м/с² и $2,0 \cdot 10^{-5}$ м/с² соответственно, случайной составляющей ошибки, имеющей СКО $9,8 \cdot 10^{-4}$ м/с² по каждой из связанных с КА осей;
- систематической не обнаруживаемой при калибровке датчика угловой скорости ошибки измерений по осям ox, oy, oz , составляющей $5,0 \cdot 10^{-4}$ рад/с, и случайной составляющей ошибки, имеющей СКО $4,8 \cdot 10^{-8}$ рад/с по каждой из связанных с КА осей.

Моделирование показало, что описанный метод ближнего наведения в условиях действия принятых возмущений сводит относительные параметры движения к требуемым значениям. Переход к ближнему наведению производился при сближении КА с ОО на 430 км. На расстоянии 1 м до ОО величина конечной относительной скорости во всех исследованных случаях лежала в пределах от 11 см/с до 23 см/с. Общий расход характеристической скорости КА не превышал 263 м/с, а продолжительность сближения – 22 ч. 45 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен метод расчета управления для сближения космического аппарата с орбитальным объектом за минимальное число витков. Получена зависимость величины импульса скорости от числа витков, через которые КА, двигаясь в центральном поле тяготения, сближится с ОО. Для уменьшения ошибок, появляющихся в реальных условиях полета, предложен метод ближнего наведения [4]. С учетом ошибок измерительных приборов, периодичности получения измерительной информации, эксцентриситета, перекоса и ограничения по величине тяги ДУ, а также инерционности вращательного движения КА рассчитаны параметры движения рассматриваемых объектов.

Предложенный метод сближения может быть использован при разработке бортовых алгоритмов управления движением КА.

Список используемых источников

1. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я.Р., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики: в 2 т. – М.: Наука, 1979. – Т. 2. – 544 с.
3. Авксентьев А.А. Оптимальное управление угловым движением космического аппарата при оперативном сближении с орбитальным объектом // Изв. вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 128–133.
4. Авксентьев А.А., Котяшов Е.В. Результативность сближения космического аппарата с пассивным объектом в условиях действия случайных возмущений // Труды XXXII Всерос. НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», 27–28 июня 2013 г. – Серпухов: филиал ВА РВСН им. Петра Великого, 2013. – С. 18–24.
5. Авксентьев А.А. Управление движением центра масс космического аппарата при мягком сближении с орбитальным объектом на участке ближнего наведения // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 364–369.

В.В. Бурмистров,
кандидат техн. наук;
М.Ю. Зоткин,
кандидат техн. наук;
М.М. Макаров,
кандидат техн. наук;
В.И. Миронов,
доктор техн. наук, профессор

МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ НАВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА-РОБОТА ПРИ ИТЕРАЦИОННОМ ТЕРМИНАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Представлены методика аналитического оценивания точности наведения космического аппарата-робота (КА-робота) при итерационном терминальном управлении сближением с орбитальным объектом в условиях действия случайных возмущений, а также результаты расчета влияния продолжительности интервала времени от последнего пересчета программы управления до окончания активного участка траектории на вероятностные характеристики точности выведения КА-робота. На основе полученных данных представлены рекомендации по выбору продолжительности этого временного интервала в зависимости от требуемой точности наведения.

Ключевые слова: космический аппарат-робот, итерационное терминальное управление, точность выведения.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития космической деятельности достаточно часто возникают ситуации, для разрешения которых требуется применение специальных средств космического базирования. К таким ситуациям относятся:

- мониторинг орбитальной группировки КА с целью определения ее технического состояния;
- распознавание среди орбитальных объектов космического мусора, стыковка с ним и вывод с орбиты;
- техническое обслуживание КА (заправка топливом, замена аккумуляторных батарей и т.д.).

В качестве орбитального средства для разрешения представленных выше проблемных ситуаций предлагается использовать автономный малогабаритный КА-робот, выводимый на орбиту в качестве попутной нагрузки.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ ВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА-РОБОТА

Пусть рассматривается ситуация, в которой КА-робот должен провести сближение с аварийным КА, совершающим неуправляемый орбитальный полет и не отвечающим на команды наземного комплекса управления, с целью его дистанционного осмотра для определения технического состояния и наличия внешних повреждений. С точки зрения управления КА-роботом такой маневр является по своему содержанию сближением в космосе с некооперируемым объектом. Вся траектория сближения КА-робота разделяется на два основных этапа – дальнего и ближнего наведения. В статье представлена методика оценивания точности наведения КА-робота при итерационном терминальном управлении в условиях действия случай-

ных возмущений для этапа дальнего наведения при наличии ограничения на время проведения маневра. Для управления сближением используются данные наземных измерительных средств или данные системы автономной навигации КА-робота. Дальнее наведение может осуществляться при сближении после участка выведения КА-робота на орбиту или при сближении с промежуточной (дежурной) орбиты. В процессе движения на этом этапе КА-робот должен быть выведен в некоторую окрестность цели, размеры которой определяются дальностью действия бортовых измерительных средств.

Рассматриваемый КА-робот совершает управляемое движение для встречи с аварийным КА за заданное время T . В момент начала маневра t_0 он находится на дежурной орбите в точке, определяемой вектором координат \bar{X}_0 и вектором скорости \bar{V}_0 . Схема полета в окрестность аварийного КА включает активный и пассивный участки траектории (АУТ и ПУТ). Предполагается, что в составе алгоритмического обеспечения бортовой системы управления КА-робота имеется алгоритм расчета параметров программы управления [1], позволяющий по текущим навигационным данным определять длительность АУТ T_1 и вектор направляющих косинусов \bar{a} силы тяги двигательной установки (ДУ), которые обеспечивают попадание в заданную область пространства за заданное время.

Отметим основные особенности анализа характеристик точности наведения КА при итерационном терминальном управлении на АУТ. При итерационном терминальном управлении интервал АУТ длительностью T_1 разбивается на N интервалов длительностью ΔT (рис. 1).



Рис. 1. Циклограмма пересчета программы управления на АУТ

На рис. 1 $\tau = T_1 - t_n$ – интервал времени от последнего пересчета программы управления до окончания АУТ.

В моменты времени $t_i = i\Delta T$ ($i = 1, 2, \dots, N$) в полете производится расчет новой программы управления по текущим навигационным данным $\bar{X}_n(t_i), \bar{V}_n(t_i)$ движения КА на АУТ. При этом обеспечивается компенсация влияния возмущающих факторов с точностью до погрешностей определения навигационных параметров.

Основное влияние на отклонение координат КА-робота относительно точки прицеливания в конце ПУТ оказывают возмущения, действующие на интервале τ . Следовательно, изменением временного интервала τ обеспечивается требуемая точность выведения КА-робота. В связи с этим необходимо определять предел изменения данного параметра исходя из заданных требований точности выведения КА-робота для конкретных расчетных условий.

Определение характеристик точности выведения КА-робота сводится к решению следующей задачи. Требуется определить корреляционную матрицу $K_{\Delta\bar{X}(T)}$ рассеивания координат КА-робота относительно расчетной точки прицеливания на заданный конечный момент времени T по вероятностным характеристикам вектора случайных возмущений $\bar{\lambda}$, действующих на интервале τ . В ходе решения задачи учтено, что в системах итерационного терминального наведения точность процесса управления по возмущающим параметрам активного участка определяется интервалом τ между последним пересчетом программы и моментом окончания АУТ [1]. Поэтому движение КА-робота рассмотрено на интервале времени $t \in [t_n, T]$, где

t_n – момент времени последнего пересчета программы управления. В данном случае продолжительность АУТ будет $T_1 = \tau$, продолжительность ПУТ – $T_{\text{ПУТ}} = T - t_n - \tau$.

В работе приняты следующие особенности решения поставленной задачи и основные допущения.

1. В интересах получения конечного аналитического решения используются приближенные модели движения КА-робота на АУТ и ПУТ в однородном центральном гравитационном поле [3], определяемые выражениями:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{X}} &= \bar{V}; \dot{\bar{V}} = -\omega^2 \bar{X} + \frac{c\beta}{1-\beta t} \bar{\alpha}; \\ \dot{\bar{X}} &= \bar{V}; \dot{\bar{V}} = -\omega^2 \bar{X},\end{aligned}$$

где ω – средняя угловая скорость движения КА по круговой орбите для рассматриваемого маневра, $\omega = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\mu}{x_1^3}} + \sqrt{\frac{\mu}{x_2^3}} \right)$;

\bar{X} – вектор координат КА-робота;

x_1 – модуль вектора координат КА-робота;

x_2 – модуль вектора координат аварийного КА;

c – скорость истечения газов ДУ КА-робота;

β – относительный секундный расход топлива, $\beta = \frac{\dot{m}}{m_0}$;

\dot{m} – секундный расход топлива;

m_0 – начальная масса КА-робота.

В этом случае векторы координат и скорости движения КА-робота по окончании заданного времени T при отсутствии возмущений определяются следующими зависимостями [4], в которых за начало отсчета времени принят момент t_n :

$$\begin{aligned}\bar{X}(T) &= \cos \omega T \cdot \bar{X}_0 + \frac{1}{\omega} \sin \omega T \cdot \bar{V}_0 + \frac{u\bar{\alpha}}{\omega^2} [\cos \omega(T - \tau) - \cos \omega T], \\ \bar{V}(T) &= -\omega \sin \omega T \cdot \bar{X}_0 + \cos \omega T \cdot \bar{V}_0 + \frac{u\bar{\alpha}}{\omega} [\sin \omega T - \sin \omega(T - \tau)].\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь модуль управляющего ускорения u принимается величиной постоянной, равной его среднему значению на интервале τ :

$$u = \frac{c\beta}{1 - \beta \left(t_n + \frac{\tau}{2} \right)}.$$

Начальные значения координат и скорости движения КА-робота в формулах (1) определяются по данным системы автономной навигации на момент t_n , так что

$$\bar{X}_0 = \bar{X}(t_n), \bar{V}_0 = \bar{V}(t_n).$$

2. Решение задачи имеет особенности в зависимости от того, какая навигационная система используется на АУТ: спутниковая, инерциальная, комбинированная. При разработке методики оценивания характеристик точности дальнего наведения предполагается, что парамет-

ры движения КА-робота на АУТ определяются по данным бортовой навигационной аппаратуры, работающей по сигналам навигационных спутников.

3. Важной особенностью решения рассматриваемой задачи является необходимость учета специфики функционала, применяемого в системе управления для выработки команды на выключение ДУ КА-робота. Далее предполагается, что такая команда выдается по условию набора требуемого приращения модуля кажущейся скорости $W_{тр}$ на интервале τ .

4. Интервал времени τ между последним пересчетом программы терминального управления и моментом окончания АУТ достаточно мал по сравнению с общей продолжительностью АУТ, отсчитываемой от момента старта КА-робота с дежурной орбиты. Поэтому методические ошибки расчета параметров управления будут малы по сравнению с ошибками наведения, порождаемыми вектором случайных возмущений, и ими можно пренебречь.

5. Случайные ошибки системы автономной навигации приводят к соответствующему промаху относительно конечной точки прицеливания. При расчете программ управления используется процедура интегрирования уравнений движения на АУТ и ПУТ [1]. Поэтому величину промаха из-за указанных ошибок расчета программы управления можно определять путем независимого оценивания влияния навигационных ошибок на точность прогнозирования движения.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ ВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА-РОБОТА ПРИ ИТЕРАЦИОННОМ ТЕРМИНАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ

В качестве вероятностных характеристик возмущений рассматриваются следующие:

$K_{\bar{q}_0}$ – корреляционная матрица исходного фазового состояния КА-робота в абсолютном движении, определяемого по данным спутниковой навигации на момент t_n ;

$\sigma_{\bar{W}}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) измерения продольной составляющей кажущегося ускорения на интервале τ ;

$\sigma_{P_{уд}}$ – СКО отклонения удельной тяги $P_{уд}$ ДУ КА-робота;

$\sigma_{\dot{m}}$ – СКО секундного расхода топлива \dot{m} ;

σ_{m_0} – СКО отклонения начальной массы КА m_0 ;

σ_{ν} , σ_{φ} – СКО отклонений параметров ориентации вектора тяги КА-робота по углам тангажа и рыскания;

$\sigma_{\delta t_k}$ – СКО запаздывания по времени исполнения команды на выключение ДУ;

$\sigma_{\Delta J}$ – СКО импульса последействия тяги.

В соответствии с изложенным выше запишем отклонение $\Delta \bar{q}(T)$ вектора фазового состояния $\bar{q}(T) [\bar{X}, \bar{V}]$ в возмущенном движении от его расчетного значения в виде

$$\Delta \bar{q}(T) = \Delta \bar{q}_0(T) + \Delta \bar{q}_{\bar{u}}(T) + \Delta \bar{q}_{\delta t_k}(T) + \Delta \bar{q}_{\Delta J}(T), \quad (2)$$

где $\Delta \bar{q}_0(T)$ – ошибки конечного фазового состояния, вызванные погрешностями определения исходного абсолютного состояния КА-робота по данным спутниковой навигации;

$\Delta \bar{q}_{\bar{u}}(T)$ – отклонения, вызванные разбросом вектора управляющего ускорения \bar{u} и ошибками измерения продольной составляющей кажущегося ускорения на интервале τ , измеряемого акселерометром, при формировании команды на выключение ДУ;

- $\Delta \bar{q}_{\delta t_k}(T)$ – отклонения из-за случайного запаздывания времени выдачи команды на выключение ДУ КА;
- $\Delta \bar{q}_{\Delta J}(T)$ – отклонения, обусловленные разбросом импульса последдействия.

Полагая рассматриваемые группы случайных возмущений статистически независимыми, для матрицы $K_{\Delta \bar{X}(T)}$ получена следующая зависимость:

$$K_{\Delta \bar{X}(T)} = \sum_{i=1}^4 K_{\Delta \hat{X}_i(T)}; \quad (3)$$

где $K_{\Delta \hat{X}_i(T)}$ – частные корреляционные матрицы отклонения координат КА-робота относительно расчетной точки прицеливания, обусловленные влиянием каждой из четырех рассматриваемых групп случайных возмущений, $i=(1, 2, \dots, 4)$.

Влияние погрешностей определения начальных координат и скорости $\Delta \bar{X}_0$ и $\Delta \bar{V}_0$. Значения матриц $K_{\Delta \hat{X}_i(T)}$, $i=(1, 2, \dots, 4)$, входящих в формулы (3), определяется с учетом (1) и рассмотренных выше допущений:

$$K_{\Delta \hat{X}_1(T)} = \cos^2 \omega T \cdot K_{\hat{X}_0} + \frac{1}{\omega^2} \sin^2 \omega T \cdot K_{\hat{V}_0} + \frac{1}{\omega} \sin 2\omega T \cdot K_{\hat{X}_0 \hat{V}_0}; \quad (4)$$

где $K_{\hat{X}_0}$, $K_{\hat{V}_0}$, $K_{\hat{X}_0 \hat{V}_0}$ – блоки общей корреляционной матрицы ошибок спутниковой навигационной системы по определению векторов координат и скорости движения КА-робота на АУТ.

Далее рассматриваются вопросы оценивания влияния на точность выведения КА-робота возмущений, обусловленных отклонениями вектора управляющего ускорения \bar{u} и ошибками измерения продольной составляющей кажущегося ускорения на интервале τ , при формировании команды на выключение ДУ.

Влияние отклонения величины управляющего ускорения Δu от расчетного значения и погрешности измерения кажущегося ускорения $\Delta \dot{W}$. Приращение координат и скорости движения КА-робота в номинальных условиях полета на заключительном интервале АУТ τ согласно (1) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{\bar{u}}(\tau) &= \frac{u \bar{\alpha}}{\omega^2} (1 - \cos \omega \tau); \\ \bar{V}_{\bar{u}}(\tau) &= \frac{u \bar{\alpha}}{\omega} \sin \omega \tau. \end{aligned} \quad (5)$$

При появлении отклонений Δu , $\Delta \bar{\alpha}$ и $\Delta \tau$ величины $\bar{X}_{\bar{u}}(\tau)$ и $\bar{V}_{\bar{u}}(\tau)$ получают следующие приращения:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{X}_{\bar{u}}(\tau) &= \Delta u \frac{\bar{\alpha}}{\omega^2} (1 - \cos \omega \tau) + \frac{u}{\omega^2} \Delta \bar{\alpha} (1 - \cos \omega \tau) + \frac{u \bar{\alpha}}{\omega^2} \sin \omega \tau \cdot \Delta \tau; \\ \Delta \bar{V}_{\bar{u}}(\tau) &= \Delta u \frac{\bar{\alpha}}{\omega} \sin \omega \tau + u \frac{\Delta \bar{\alpha}}{\omega} \sin \omega \tau + u \bar{\alpha} \cdot \cos \omega \tau \cdot \Delta \tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Выключение ДУ должно произойти при условии набора требуемого приращения продольной составляющей кажущейся скорости $W_{\text{тп}}$, т.е. модуля вектора $\bar{V}_{\bar{u}}$ на интервале τ , которое определяется при расчетных значениях $u = u_p$ и $\tau = \tau_p$ по формуле

$$W_{\text{тп}} = \frac{u_p}{\omega} \sin \omega \tau_p \quad (7)$$

Команда на выключение ДУ подается при выполнении условия

$$W_{\text{изм}}(\tau) = W_{\text{тр}}.$$

Измеренное значение приращения кажущейся скорости определяется по параметрам фактического значения управляющего ускорения u с некоторой ошибкой измерений $\Delta W(\tau)$, которую можно найти по формуле

$$\Delta W(\tau) = \tau \cdot \Delta \dot{W},$$

где $\Delta \dot{W}$ – ошибка измерения продольной составляющей кажущегося ускорения на интервале τ .

Таким образом, с учетом (5) функционал выключения двигателя принимает следующий вид:

$$\frac{(u_p + \Delta u)}{\omega} \sin \omega(\tau_p + \Delta \tau) + (\tau_p + \Delta \tau) \cdot \Delta \dot{W} = W_{\text{тр}}.$$

Варьируя это равенство, можно определить связь между отклонениями параметров Δu и $\Delta \tau$ с точностью до линейных членов:

$$\frac{\Delta u}{\omega} \sin \omega \tau_p + u_p \cos \omega \tau_p \cdot \Delta \tau + \tau_p \cdot \Delta \dot{W} = 0.$$

Отсюда следует:

$$\Delta \tau = -\frac{1}{u_p \cos \omega \tau_p} \left(\frac{\Delta u}{\omega} \sin \omega \tau_p + \tau_p \cdot \Delta \dot{W} \right). \quad (8)$$

Полученное значение $\Delta \tau$ используется в выражении (6) для определения отклонений параметров движения КА-робота в конце АУТ при указанном способе выключения ДУ:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{X}_{\bar{u}}(\tau) &= \frac{\bar{\alpha}}{\omega^2} \left(1 - \cos \omega \tau - \frac{\sin^2 \omega \tau}{\omega \cdot \cos \omega \tau} \right) \Delta u + \frac{u}{\omega^2} \Delta \bar{\alpha} (1 - \cos \omega \tau) - \frac{\bar{\alpha}}{\omega^2} \operatorname{tg} \omega \tau \cdot \tau_p \cdot \Delta \dot{W}; \\ \Delta \bar{V}_{\bar{u}}(\tau) &= u \frac{\Delta \bar{\alpha}}{\omega} \sin \omega \tau - \bar{\alpha} \cdot \tau_p \cdot \Delta \dot{W} \end{aligned} \quad (9)$$

В связи с тем, что в (9) параметры \bar{u} и τ принимают расчетные значения, определяются корреляционные матрицы $K_{\hat{X}_u(\tau)\hat{V}_u(\tau)}$ и $K_{\Delta \bar{\alpha}}$, а также дисперсия $\sigma_{\Delta u}^2$.

Согласно (9) получаем выражения:

$$\begin{aligned} K_{\hat{X}_u(\tau)} &= \frac{\bar{\alpha} \cdot \bar{\alpha}^T}{\omega^4} \left(1 - \cos \omega \tau - \frac{\sin^2 \omega \tau}{\omega \cdot \cos \omega \tau} \right)^2 \sigma_{\Delta u}^2 + \frac{u^2}{\omega^4} (1 - \cos \omega \tau)^2 K_{\Delta \bar{\alpha}} + \frac{\bar{\alpha} \cdot \bar{\alpha}^T}{\omega^4} \operatorname{tg}^2 \omega \tau \cdot \tau_p^2 \cdot \sigma_{\Delta \dot{W}}^2; \\ K_{\hat{V}_u(\tau)} &= \frac{u^2}{\omega^2} \sin^2 \omega \tau K_{\Delta \bar{\alpha}} + \bar{\alpha} \cdot \bar{\alpha}^T \cdot \tau_p^2 \cdot \sigma_{\Delta \dot{W}}^2; \\ K_{\hat{X}_u(\tau)\hat{V}_u(\tau)} &= \frac{u^2}{\omega^3} (1 - \cos \omega \tau) \cdot \sin \omega \tau \cdot K_{\Delta \bar{\alpha}} + \frac{\bar{\alpha} \cdot \bar{\alpha}^T}{\omega^2} \operatorname{tg} \omega \tau \cdot \tau_p^2 \cdot \sigma_{\Delta \dot{W}}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Матрица $K_{\hat{X}_u(\tau)\hat{V}_u(\tau)}$ характеризует корреляционные связи между соответствующими отклонениями векторов координат и скорости.

Далее рассчитывается дисперсия модуля реактивного ускорения $\sigma_{\Delta u}^2$ и корреляционная матрица вектора направляющих косинусов $K_{\Delta \bar{\alpha}}$, которые входят в формулы (10).

Поскольку

$$u = \frac{c\beta}{1 - \beta \left(t_n + \frac{\tau}{2} \right)},$$

то

$$\Delta u = \frac{\Delta c}{c} \cdot u + \frac{\Delta \beta}{\beta} \cdot u \left[1 + \frac{u}{c} \left(t_n + \frac{\tau}{2} \right) \right], \quad (11)$$

где Δc и $\Delta \beta$ – отклонения скорости истечения газов ДУ и относительного расхода топлива от их расчетных значений.

Тогда

$$\sigma_{\Delta u}^2 = \left(\frac{u}{c} \right)^2 \cdot \sigma_{\Delta c}^2 + \left(\frac{u}{\beta} \right)^2 \cdot \left[1 + \frac{u}{c} \left(t_n + \frac{\tau}{2} \right) \right]^2 \cdot \sigma_{\Delta \beta}^2, \quad (12)$$

где $\sigma_{\Delta c}^2$, $\sigma_{\Delta \beta}^2$ – дисперсии отклонений скорости истечения газов ДУ и относительного расхода топлива от их расчетных значений, которые определяются, в свою очередь, через средне-квадратическое отклонение (СКО) удельной тяги $\sigma_{P_{уд}}$, секундного расхода топлива $\sigma_{\dot{m}}$ и начальной массы σ_{m_0} , заданные в составе исходных данных, по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta c} &= g_0 \cdot \sigma_{P_{уд}}; \\ \sigma_{\Delta \beta} &= \frac{1}{m_0} \left(\sigma_{\dot{m}}^2 + \beta^2 \cdot \sigma_{m_0}^2 \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

Далее необходимо получить расчетное соотношение для вычисления корреляционной матрицы $K_{\Delta \bar{\alpha}}$.

Вектор направляющих косинусов $\bar{\alpha}$ определяется через значения углов тангажа ϑ и рыскания ψ следующими выражениями:

$$\bar{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cdot \cos \psi \\ \sin \vartheta \cdot \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix},$$

так что

$$\vartheta = \arctg \frac{\alpha_y}{\alpha_x}, \quad \psi = \arcsin \alpha_z.$$

Тогда

$$\Delta \bar{\alpha} = A_{\bar{\alpha}} \cdot (\Delta \vartheta, \Delta \psi)^T, \quad (13)$$

где $A_{\bar{\alpha}}$ – матрица частных производных,

$$A_{\bar{\alpha}} = \begin{pmatrix} -\sin \vartheta \cos \psi & -\cos \vartheta \sin \psi \\ \cos \psi \cos \vartheta & -\sin \vartheta \sin \psi \\ 0 & \cos \psi \end{pmatrix}.$$

В результате корреляционная матрица имеет вид

$$K_{\Delta \bar{\alpha}} = A_{\bar{\alpha}} \cdot K_{\vartheta, \psi} \cdot A_{\bar{\alpha}}^T, \quad (14)$$

где $K_{\vartheta, \psi} = \begin{pmatrix} \sigma_{\vartheta}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\psi}^2 \end{pmatrix}.$

Этим завершается определение элементов $\sigma_{\Delta u}^2$ и $K_{\Delta \bar{a}}$, входящих в формулы (10).

Для определения совместного влияния ошибок вектора реактивного ускорения $\Delta \bar{u}$ и измерений кажущегося ускорения $\Delta \dot{W}$ в конечный промах, т.е. для определения значений $K_{\Delta \hat{X}_3}, K_{\Delta \hat{V}_3}, K_{\Delta \hat{X}_3 \Delta \hat{V}_3}$ необходимо воспользоваться выражением (4), заменив в нем величины $K_{\hat{X}_u}, K_{\hat{V}_u}$ и $K_{\hat{X}_u \hat{V}_u}$ на значения $K_{\hat{X}_u(\tau)}, K_{\hat{V}_u(\tau)}$ и $K_{\hat{X}_u(\tau) \hat{V}_u(\tau)}$ соответственно:

$$K_{\Delta \hat{X}_2(T)} = \cos^2 \omega T_{\text{ПУТ}} \cdot K_{\hat{X}_u(\tau)} + \frac{1}{\omega^2} \sin^2 \omega T_{\text{ПУТ}} \cdot K_{\hat{V}_u(\tau)} + \frac{1}{\omega} \sin 2\omega T_{\text{ПУТ}} \cdot K_{\hat{X}_u(\tau) \hat{V}_u(\tau)}.$$

Влияние запаздывания по времени исполнения команды на выключение ДУ δt_k и импульса последствия тяги ΔJ на конечный промах. Данные возмущения вызывают соответствующие отклонения модуля приращения кажущейся скорости на АУТ от расчетного значения:

$$\Delta \bar{V}_{t_k} = u \bar{a} \cdot \delta t_k, \quad \Delta \bar{V}_J = \bar{a} \cdot \Delta J. \quad (15)$$

Рассматривая эти величины как возмущения начальной скорости на пассивном участке полета в силу (5) получены следующие выражения:

$$K_{\Delta \hat{X}_3(T)} = \frac{u^2}{\omega^2} \sin^2 \omega T_{\Pi} \bar{a} \cdot \bar{a}^T \cdot \sigma_{\delta t_k}^2; \quad (16)$$

а также

$$K_{\Delta \hat{X}_4(T)} = \frac{1}{\omega^2} \sin^2 \omega T_{\Pi} \bar{a} \cdot \bar{a}^T \cdot \sigma_{\Delta J}^2.$$

В результате проведенного анализа определены зависимости для вычисления корреляционной матрицы $K_{\Delta \hat{X}(T)}$, рассчитывающей вероятностные характеристики рассеивания по координатному промаху в предположении, что $K_{\hat{X}_0 \hat{V}_0} = K_{\hat{X}_u(\tau) \hat{V}_u(\tau)} = 0$:

$$K_{\Delta \hat{X}(T)} = \cos^2 \omega T_{\Pi} \cdot K_{\hat{X}_0} + \cos^2 \omega T_{\text{ПУТ}} \cdot K_{\hat{X}_u(\tau)} + \frac{1}{\omega^2} \left(\sin^2 \omega T_{\Pi} \cdot K_{\hat{V}_0} + \sin^2 \omega T_{\text{ПУТ}} \cdot K_{\hat{V}_u(\tau)} \right) + \frac{\sin^2 \omega T_{\text{ПУТ}}}{\omega^2} \bar{a} \cdot \bar{a}^T \left(u^2 \cdot \sigma_{\delta t_k}^2 + \sigma_{\Delta J}^2 \right),$$

где

$$K_{\hat{X}_u(\tau)} = \frac{\bar{a} \cdot \bar{a}^T}{\omega^4} \left(1 - \cos \omega \tau - \frac{\sin^2 \omega \tau}{\omega \cdot \cos \omega \tau} \right)^2 \sigma_{\Delta u}^2 + \frac{u^2}{\omega^4} (1 - \cos \omega \tau)^2 K_{\Delta \bar{a}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{a}^T}{\omega^4} \text{tg}^2 \omega \tau \cdot \tau_p^2 \cdot \sigma_{\Delta \dot{W}}^2;$$

$$K_{\hat{V}_u(\tau)} = \frac{u^2}{\omega^2} \sin^2 \omega \tau K_{\Delta \bar{a}} + \bar{a} \cdot \bar{a}^T \cdot \tau_p^2 \cdot \sigma_{\Delta \dot{W}}^2; \quad K_{\Delta \bar{a}} = A_{\bar{a}} \cdot K_{\vartheta, \psi} \cdot A_{\bar{a}}^T;$$

$$A_{\bar{a}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \bar{a}}{\partial \vartheta} & \frac{\partial \bar{a}}{\partial \psi} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} -\sin \vartheta \cos \psi & -\cos \vartheta \sin \psi \\ \cos \psi \cos \vartheta & -\sin \vartheta \sin \psi \\ 0 & \cos \psi \end{pmatrix}; \quad K_{\vartheta, \psi} = \begin{pmatrix} \sigma_{\vartheta}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\psi}^2 \end{pmatrix};$$

$$\sigma_{\Delta u}^2 = \left(\frac{u}{c} \right)^2 \cdot \sigma_c^2 + \left(\frac{u}{\beta} \right)^2 \left[1 + \frac{u}{c} \left(t_n + \frac{\tau}{2} \right) \right] \sigma_{\beta}^2;$$

$$\sigma_c = g_0 \cdot \sigma_{P_{\text{YA}}}; \quad \sigma_{\beta} = \frac{1}{m_0} \left(\sigma_{\dot{m}}^2 + \beta^2 \cdot \sigma_{m_0}^2 \right)^{1/2};$$

$$T_{\Pi} = T - t_n = \tau + T_{\text{ПУТ}}.$$

Данная методика позволяет аналитически оценить вероятностные характеристики промаха относительно расчетной точки прицеливания при терминальном управлении на этапе дальнего наведения.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При исследовании характеристик точности выведения КА-робота при итерационном терминальном управлении на АУТ принимался состав и характеристики случайных возмущений, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Состав и характеристики возмущающих факторов

№ п/п	Наименование возмущающих факторов	Среднеквадратическое отклонение		
		Обозначение	Единицы измерения	Значение
1	Погрешность измерения кажущегося ускорения	$\sigma_{\ddot{w}}$	м/с ²	0,002
2	Погрешность определения координат КА-робота	$\sigma_{x_{II}}$	м	30
3	Погрешность определения скорости КА-робота	$\sigma_{V_{II}}$	м/с	0,2
4	Отклонение удельной тяги ДУ КА-робота	$\sigma_{P_{yo}}$	%	0,5
5	Отклонение начального значения массы КА-робота от расчетного	σ_{m_0}	%	0,1
6	Отклонение секундного расхода топлива	$\sigma_{\dot{m}}$	%	1
7	Отклонение углов ориентации вектора тяги от расчетных	σ_{δ}	рад	0,01
8	Отклонение времени выполнения команды на выключение ДУ КА-робота	$\sigma_{\Delta t}$	с	0,01
9	Импульс последствия тяги	$\sigma_{\Delta J}$	м/с	0,2

При проведении численных исследований основное внимание было уделено анализу влияния продолжительности интервала τ на среднеквадратическое отклонение элементов вектора промаха КА-робота. Расчеты проводились при следующем составе исходных данных: высота орбиты КА-робота – 600 км; высота орбиты аварийного КА – 1000 км; угловая дальность точки встречи – 170°; наклонение орбит – 60°; заданное время T – 2890 с; относительный секундный расход топлива для ДУ КА-робота – 0,0015 1/с; скорость истечения газов ДУ КА-робота – 3000 м/с.

Таблица 2

Зависимости значений среднеквадратических отклонений элементов вектора промаха $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ от величины параметра τ

$\tau, \text{с}$	$\sigma_x, \text{м}$	$\sigma_y, \text{м}$	$\sigma_z, \text{м}$
1	32.952	26.378	21.821
3	35.286	30.478	25.450
5	39.748	35.513	31.927
7	56.009	52.207	48.209
9	83.708	79.255	74.406
11	110.677	104.173	99.273

В табл. 2 приведены зависимости значений среднеквадратических отклонений элементов вектора промаха σ_x , σ_y , σ_z от величины параметра τ , характеризующего продолжительность интервала от последнего пересчета программы управления до окончания АУТ. На рис. 2 эти зависимости представлены в графическом виде.

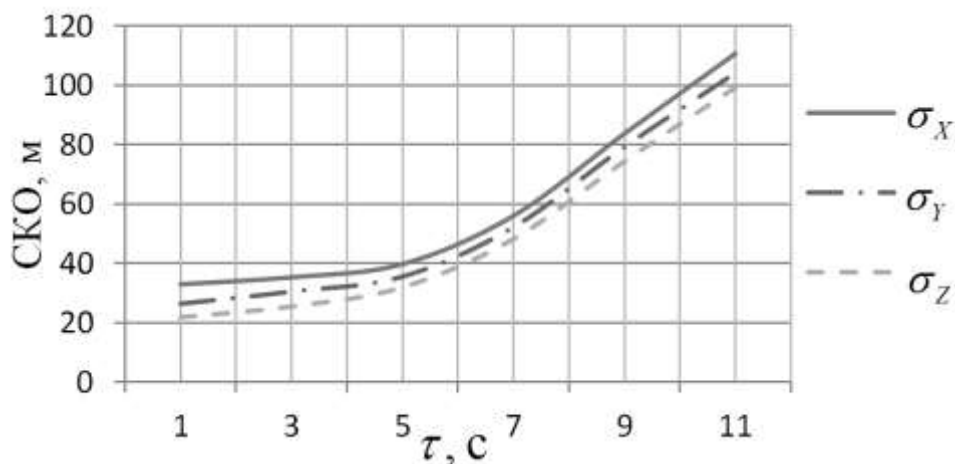


Рис. 2. Зависимости СКО координат КА-робота относительно расчетной точки прицеливания от параметра τ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований получены следующие выводы:

1. Расчеты подтвердили существенное влияние величины интервала τ на СКО параметров движения КА-робота в конечной точке прицеливания.
2. В принятых расчетных условиях и характеристиках возмущающих факторов при уменьшении интервала τ от 11 до 1 с СКО параметров движения КА в конечной точке прицеливания уменьшается в 2,5 раза.
3. Данная методика позволяет проводить предварительную оценку характеристик точности выведения КА-робота в окрестность аварийного КА для различных расчетных условий, а также определять временной интервал τ исходя из требуемой точности выведения.
4. При ограничении СКО элементов вектора промаха $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ значением 50 м интервал τ следует выбрать равным 5 с.

Список используемых источников

1. Макаров М.М., Миронов В.И., Миронов Ю.В. Применение метода Эйлера – Ламберта для расчета программы управления сближением космических аппаратов в нецентральной гравитационном поле Земли с конечной тягой // Вопросы электромеханики. – 2015. – Т. 144. – С. 29–35.
2. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация КА. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.
3. Ильин В.А., Кузмак Г.Е. Оптимальные перелеты космических аппаратов. – М.: Наука, 1976. – 744 с.
4. Бэттин Р.Х. Наведение в космосе. – М.: Машиностроение, 1966. – 448 с.

В.В. Джумков,
кандидат техн. наук;
А.М. Петушков,
кандидат военных наук, старший научный сотрудник;
С.Э. Черный,
кандидат техн. наук

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Обоснована необходимость совершенствования научно-методического аппарата исследования эффективности научной деятельности научно-исследовательских организаций Министерства обороны Российской Федерации, рассмотрены основные особенности исследуемой предметной области, предложена иерархическая система показателей эффективности научной деятельности, проанализированы возможности визуализации и интерпретации результатов оценивания эффективности научной деятельности по показателям разных уровней, а также сформулированы предложения по разработке и использованию соответствующей методики для решения практических управленческих задач.

Ключевые слова: научная деятельность научно-исследовательских организаций, иерархическая система показателей эффективности научной деятельности, оценивание эффективности научной деятельности.

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс современного общества неразрывно связан с таким важнейшим видом человеческой деятельности, как наука. При этом реалии современного мира таковы, что вооруженные силы (ВС) государств, являясь неотъемлемой частью человеческого общества, служат не только гарантом их независимости и безопасности, но зачастую и «двигателем прогресса». Успешное строительство и развитие ВС всецело зависит от оснащения перспективными средствами вооружения и использования передовых способов их применения, что обеспечивается соответствующими научными исследованиями. С возрастанием роли научных исследований повышаются требования к обоснованности научных рекомендаций, расширяется тематика военно-научных разработок, совершенствуются формы и способы исследовательской деятельности. Этим обусловлена необходимость совершенствования военно-научного комплекса, приведения его в соответствие с актуальными и перспективными задачами, на что указано в «Концепции развития военно-научного комплекса Вооруженных Сил Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», утвержденной Министерством обороны Российской Федерации в 2015 г.

К научной работе в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ), безусловно, могут в установленном порядке привлекаться научно-исследовательские организации (НИО) федеральных органов исполнительной власти, Российской академии наук, образовательные организации высшего образования и т.д. Но непосредственно в составе военно-научного комплекса ВС РФ научной деятельностью занимается ряд НИО Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ), под которыми следует понимать не только научно-исследовательские (испытательные) институты и центры видов и родов войск ВС РФ, но и высшие военные учебные заведения, удаленные научные подразделения на испытательных полигонах (космодромах, в центрах) и другие организации ВС, осуществляющие в качестве основного вида деятельности научную и (или) научно-техническую деятельность, в составе которых есть штатные должности научных сотрудников (работников).

Основным содержанием научных исследований и разработок НИО МО РФ руководящими документами определено:

- научное обоснование основных направлений строительства и развития ВС РФ в целом, а также видов и родов войск;
- оперативно-стратегическое обоснование создания и применения группировок войск (сил);
- формирование и реализация требований к системам и образцам вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ);
- решение научно-практических задач в интересах ВС РФ.

Приведенный перечень, даже без раскрытия содержания, указывает на высокую степень важности решаемых НИО МО РФ задач, что в современных условиях определяет необходимость их решения с высоким качеством, в требуемые сроки и при разумном расходовании ресурсов. Указанные требования могут быть выполнены только при обеспечении необходимого уровня эффективности функционирования как военно-научного комплекса в целом, так и отдельных НИО МО РФ.

И военно-научный комплекс в целом, и отдельные НИО ВС РФ представляют собой сложные организационно-технические системы, поскольку характеризуются множеством возможных состояний и отличаются сложным строением и сложным поведением [1]. Элементы сложной системы функционируют во взаимодействии, в результате чего свойства (объективные особенности объекта, зависящие от его строения и характеризующие отдельные его стороны) сложной системы определяются не только (и не столько) свойствами ее элементов и подсистем, но и характером взаимодействия между ними, т.е. новыми, так называемыми системными свойствами.

Целью изучения эффективности функционирования сложной системы является приобретение сведений для выработки рекомендаций лицу, принимающему решение, по рациональному выбору стратегий, обеспечивающих успешное выполнение системой стоящих перед ней задач. Проблемам оценивания эффективности функционирования сложных систем посвящено большое количество работ, например [2–4], в которых приводится не всегда однозначная терминология. Поэтому во избежание двусмысленности необходимо определиться с некоторыми терминами и понятиями, используемыми в статье.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Пригодность системы для использования по назначению обуславливается ее качеством – совокупностью определенных (существенных) свойств. В зависимости от назначения системы совокупность свойств, учитываемых при исследовании ее качества, может быть различна. Существенные свойства в соответствии с представлением системы как семантической модели можно условно классифицировать не только по уровню сложности, но и по принадлежности к системообразующим (общесистемным), структурным или функциональным группам.

Использование системы направлено на достижение определенной цели (совокупности целей). Упорядоченную совокупность взаимосвязанных действий, направленных на ее достижение, называют операцией. Тогда свойства, которые характеризуют процесс функционирования (поведение) системы, можно назвать операционными свойствами или свойствами операции.

Под термином показатель (П) некоторого свойства системы будем понимать переменную величину (меру, представляющую собой числовую характеристику или функцию), значения которой характеризуют результат проявления этого свойства.

Оценивание (процедура определения численных значений показателей, то есть получения оценок) операционных свойств системы в общем случае проводится по двум аспектам [результаты операции и способ (алгоритм) их получения] путем использования показателей ка-

чества операции, к которым относят результативность, ресурсоемкость и оперативность (аналогично называются и соответствующие операционные свойства).

Результативность (рез) характеризуется получаемым целевым эффектом, ради которого функционирует система (результат, ради которого проводится операция).

Ресурсоемкость (рес) характеризуется ресурсами всех видов (людскими, материально-техническими, энергетическими, информационными, финансовыми и т.п.), используемыми для получения целевого эффекта.

Оперативность характеризуется расходом операционного времени, т.е. времени, необходимого для достижения цели операции.

Выбор показателей для конкретной системы связан с анализом большого объема плохо структурированной информации, и поэтому в системном анализе [5] сформулированы общие требования (соответствие цели операции, полнота, измеримость, ясность физического смысла, избыточность, чувствительность), следование которым позволяет обосновать применимость показателей в конкретной задаче оценивания.

Конкретный физический смысл показателей определяется характером и целями операции, а также качеством реализующей ее системы и внешними воздействиями. При этом важно, что качество операции в целом не может быть охарактеризовано ни одним из перечисленных частных свойств в отдельности, а определяется только их совокупностью (вектором).

В совокупности результативность, ресурсоемкость и оперативность порождают комплексное свойство – эффективность процесса, которое определяется как степень приспособленности процесса к достижению цели. Это свойство проявляется при целенаправленном функционировании системы и зависит как от свойств самой системы, так и от внешней среды. Таким образом, эффективность операции есть обобщенное (комплексное) определяющее функциональное свойство системы, реализующей операцию, которое с гносеологической (познавательной) точки зрения раскрывается через категорию цели (желаемый результат) и объективно выражается степенью достижения цели (выполнения стоящих перед системой задач, т.е. конкретизированной цели) с учетом затрат ресурсов и времени на реализацию операции.

Существует также понятие «потенциальная эффективность операции, характеризуемая предельно выгодным обменом» (результат за ресурсы), которая определяется как эффективность операции при идеальном способе использования активных средств (непосредственно обеспечивающих целевой эффект), то есть при выборе лучшей стратегии (определенной организации и способа проведения операции).

Необходимо отметить, что в литературе термин «эффективность» связывается и с системой, и с операцией, и с решением. Образующие при этом понятия можно считать эквивалентными. В конечном счете каждое из них отражает соответствие исхода операции поставленной цели.

Показатели (функции показателей) результатов операции, на основе которых формируется критерий эффективности, принято называть показателями эффективности. При этом под критерием понимается совокупность требований, которым должны удовлетворять значения показателя (совокупности показателей). Другими словами, это признак, основание, правило принятия решения по оцениванию чего-либо на соответствие предъявленным требованиям. Процесс выбора критерия эффективности, выступая самым ответственным моментом исследования системы (гораздо лучше найти неоптимальное решение по правильно выбранному критерию, чем наоборот – оптимальное решение при неправильно выбранном критерии), является в значительной мере субъективным, творческим, требующим в каждом отдельном случае индивидуального подхода. Наибольшей сложностью отличается выбор критерия эффективности операций, реализуемых иерархическими системами.

Таким образом, для исследования эффективности научной деятельности НИО прежде всего потребуется установить цели, стоящие перед системой на оцениваемом интервале времени, конкретизировать их, выделив тем самым решаемые системой задачи, затем определить

систему оцениваемых показателей операционных свойств и только после этого сформулировать критерий, по которому можно будет определять степень соответствия эффективности научной деятельности НИО установленным вышестоящим органом военного управления (ОВУ) требованиям.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Директивными документами МО РФ определены цели [получение новых знаний в интересах развития военной теории и практики и их реализация путем внедрения и эффективного использования научных достижений в практике войск (сил)], задачи (исследование и прогнозирование военных угроз, обоснование направлений строительства и развития ВС РФ, обоснование перспектив создания и развития ВВСТ и др.), формы (выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, оперативных заданий, публикации научных трудов и др.) и организация (руководство, планирование, проведение, отчетность и контроль) научной работы в ВС РФ. При этом специфика конкретных НИО учитывается при разработке соответствующих Положений о научной работе организаций.

Конкретное наполнение решаемых задач происходит на этапе планирования научной работы: Генеральный штаб ВС РФ разрабатывает План проведения научных исследований в области обороны РФ (на 5 лет), для его реализации Военно-научный комитет (ВНК) ВС РФ ежегодно формирует План научной работы ВС, на основании которого разрабатываются согласованные планы научной работы на год видов, родов войск, ОВУ и в итоге конкретных НИО. В процессе выполнения планов состав научной работы корректируется, например путем выполнения срочных (внеплановых) работ и оперативных заданий. Научные задачи отличаются содержанием, важностью, сложностью, составом привлекаемых для их решения ресурсов и т.п. Но именно совокупность решенных с требуемым качеством разнородных научных задач характеризует результат научной деятельности НИО за какой-либо период времени.

Успешность выполнения планов научной работы во многом определяется имеющимися у НИО возможностями (потенциальными ресурсами всех видов) и правильным их использованием. Расход ресурсов НИО за год в принципе может быть определен и выражен в денежном эквиваленте, но установление того, какая часть ресурсов потрачена именно на научную работу (особенно для НИО, занимающихся и другими видами деятельности, например, учебной), вряд ли представляется возможным. Научная работа является творческим процессом, поэтому формализовать расход, например, людских ресурсов крайне затруднительно.

Аналогичные рассуждения уместны и для операционного времени, поэтому применительно к научной деятельности оперативность следует трактовать как своевременность (актуальность) полученных результатов, как соблюдение установленных ОВУ сроков выполнения работ.

Таким образом, краткий анализ предметной области позволяет сделать следующие предварительные выводы:

- научную работу НИО целесообразно оценивать по результатам выполнения годового плана (нескольких годовых планов подряд), период оценивания определяется ОВУ исходя из соображений необходимости и достаточности;
- оценивать эффективность научной деятельности НИО целесообразно не по одному обобщенному показателю, а по комбинации двух – результативности и ресурсоемкости, поскольку они являются неоднородными, и поэтому отсутствует возможность их содержательного сопоставления;
- показатель результативности ($P_{рез}$) научной работы должен быть интегральным (комплексным, многокомпонентным), чтобы учитывать разнообразие форм научной работы,

сложность, значимость (весомость для общего результата) и качество выполнения задач того или иного типа;

- показатель ресурсоемкости ($P_{рес}$) научной работы также должен быть интегральным (для учета различных ресурсов), но при этом его компоненты в основном будут носить «потенциальный» характер по соответствующим видам ресурсов;

- показатель оперативности отдельно в данном случае можно не рассчитывать, а несвоевременность решения научных задач допустимо учесть введением понижающих коэффициентов для компонентов $P_{рез}$;

- система показателей эффективности должна иметь неизбыточную иерархичную структуру, позволяющую менять при необходимости число показателей нижних уровней, которые должны достаточно просто рассчитываться на основе известных статистических отчетных данных НИО и наглядно отражать значимые аспекты научной работы;

- необходимо предусмотреть процедуру нормирования показателей нижнего уровня, чтобы избежать проблем, связанных с различной размерностью и разновеликостью исходных данных;

- группировать независимые, но при этом содержательно сопоставимые показатели следует поэтапно (от единичных к обобщенным), используя аддитивные (линейные) взвешенные свертки, что позволяет сделать расчеты достаточно простыми и наглядными. Мультипликативные свертки в данном случае неприменимы, поскольку любой показатель при нулевом значении автоматически обнуляет показатели более высоких уровней, что не соответствует физическому смыслу.

Учитывая сделанные выводы, для оценки эффективности научной деятельности НИО Министерства обороны Российской Федерации следует использовать методику, изложенную в [6], а систему показателей эффективности (ПЭ) научной деятельности (НД) НИО МО РФ можно изобразить в виде общей схемы, представленной на рис. 1.

Единичные ПЭ НД НИО P_{ijk} (показатели нижнего уровня) формируются путем обработки массива исходных данных $\{ИД\}$ (совокупности статистических сведений о научной деятельности НИО за отчетный период). При этом используются простые функциональные зависимости f_{ijk} [аддитивные взвешенные свертки и (или) относительные величины]. Для сверток используются исходные данные одной размерности, которые можно объединить по общности содержания. Взвешенность слагаемых задается введением соответствующих весовых коэффициентов (K) их значимости.

Основой системы ПЭ НД НИО является множество частных показателей, являющихся отражением значимых (различимых) аспектов (свойств) процесса научной деятельности НИО. Частные ПЭ выражаются в виде сумм не только взвешенных, но и нормированных единичных ПЭ. Функция нормирования переводит единичные показатели разной размерности в безразмерные, выраженные в долях единицы величины по следующему правилу:

$$\text{НОРМ}(P_{ijk}) = (P_{ijk \text{ факт}} - P_{ijk \text{ кр}}) / (P_{ijk \text{ опт}} - P_{ijk \text{ кр}}), \quad (1)$$

где P_{ijk} – k -й единичный ПЭ, входящий в состав j -го частного ПЭ из i -й группы;
 $P_{ijk \text{ факт}}$ – фактическое (рассчитанное) значение P_{ijk} ;
 $P_{ijk \text{ кр}}$ – критическое (минимально допустимое) значение P_{ijk} ;
 $P_{ijk \text{ опт}}$ – оптимальное (рациональное) значение P_{ijk} .

При этом, если $P_{ijk \text{ факт}} \geq P_{ijk \text{ опт}}$, то $\text{НОРМ}(P_{ijk})$ принимается равным 1, если $P_{ijk \text{ факт}} \leq P_{ijk \text{ кр}}$, то равным 0. Если для какого-либо единичного ПЭ $P_{ijk \text{ опт}} < P_{ijk \text{ кр}}$, то формулу (1) необходимо изменить, поменяв местами уменьшаемое и вычитаемое (и в числителе, и в знаменателе), и, соответственно, скорректировать правило установления значения, равного 1(0).

Значения $P_{ijk \text{ кр}}$ и $P_{ijk \text{ опт}}$ либо задаются директивно ОВУ, либо определяются путем экспертного оценивания, либо рассчитываются по выборке значений $P_{ijk \text{ факт}}$ для совокупности НИО (или для одного НИО за несколько периодов оценивания).

Количество и названия групповых ПЭ определены требованиями руководящих документов (в частности, приказом Министра обороны Российской Федерации от 30 июня 2015 г. № 380 «Об утверждении Методики оценки результативности научной деятельности научно-исследовательских организаций Министерства обороны Российской Федерации») и соответствуют сложившимся на сегодняшний день представлениям о направлениях, по которым следует оценивать результативность и ресурсоемкость научной деятельности НИО. Кроме того, подобное группирование частных ПЭ позволяет проводить промежуточный анализ информации, получаемой при поэтапном (по уровням) оценивании эффективности научной деятельности НИО.

И групповые, и интегральные (обобщенные) ПЭ также являются аддитивными взвешенными свертками частных (соответственно групповых) ПЭ. Значения коэффициентов весомости (значимости) каждого из ПЭ любого уровня определяются экспертным путем.

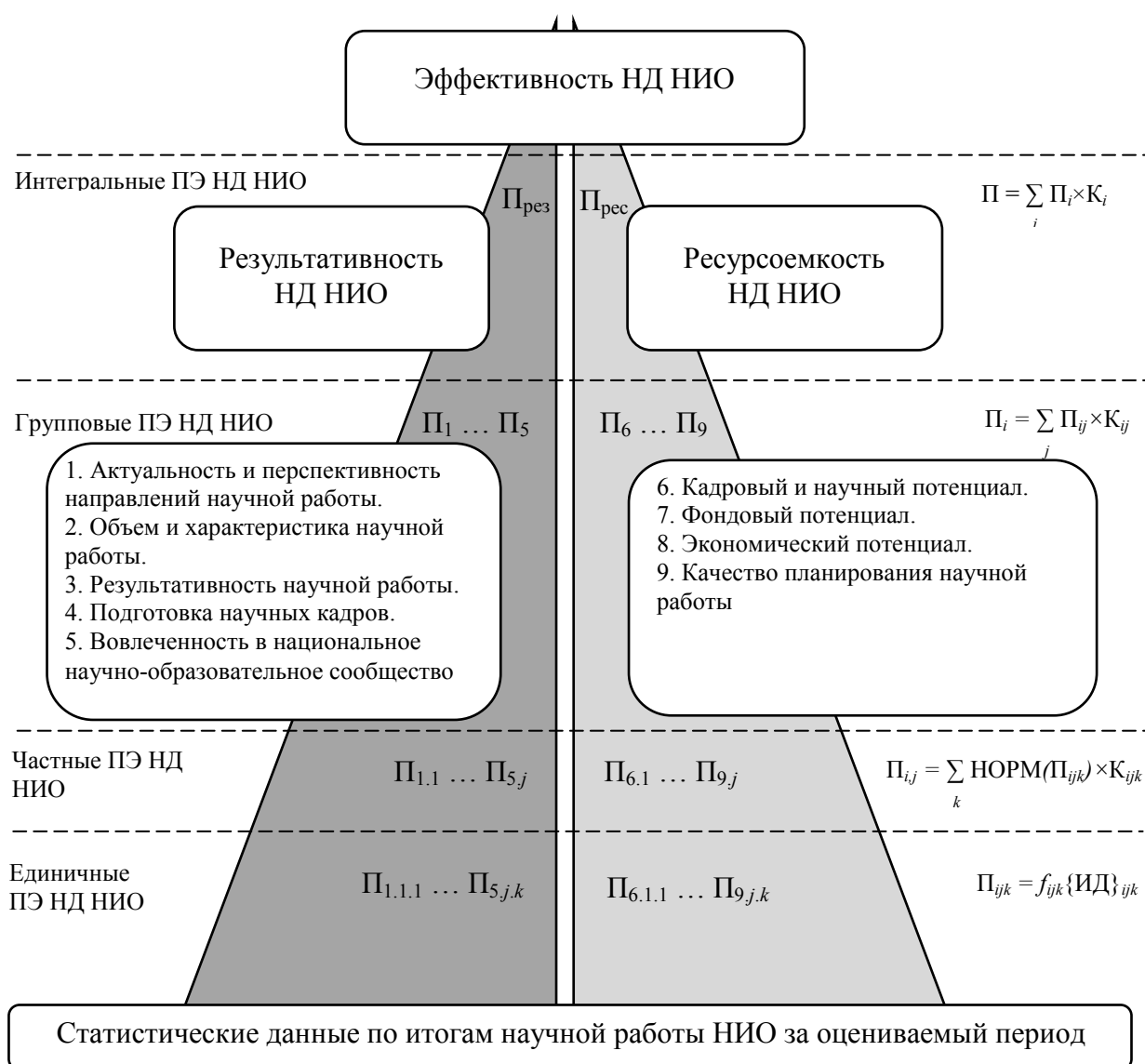


Рис. 1. Система показателей эффективности научной деятельности научно-исследовательских организаций Министерства обороны Российской Федерации

ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Оценивание эффективности научной деятельности НИО предлагается осуществлять на основании анализа вариантов сочетания оценочных значений показателей результативности и ресурсоемкости. Тогда критерий отнесения НИО к одной из трех категорий [6] [I категория – научные организации, являющиеся лидерами; II категория – стабильные (эффективные) научные организации; III категория – научные организации, утратившие научную деятельность в качестве основного вида деятельности и перспективы развития (деградирующие НИО)] может быть сформулирован, например, в виде следующего правила:

- если оценочные значения $P_{рез}$ и $P_{рес}$ больше соответственно $P_{рез\ опт}$ и $P_{рес\ опт}$, то НИО относится к I категории;
- если хотя бы одно из оценочных значений $P_{рез}$ или $P_{рес}$ меньше соответственно $P_{рез\ кр}$ или $P_{рес\ кр}$, то НИО относится к III категории;
- в остальных случаях НИО относится ко II категории.

Категорирование НИО, безусловно, не является самоцелью, а служит основанием для выработки управляющих решений ОВУ (ВНК). При этом результаты оценивания эффективности научной деятельности совокупности НИО по двум интегральным показателям можно представить в виде столбчатой диаграммы (гистограммы), которая наглядно будет отражать общую картину и причины отнесения каждой НИО к одной из категорий. Рис. 2 иллюстрирует подобное графическое представление для семи НИО, при этом для упрощения принято: $P_{рез\ опт} = P_{рес\ опт} = P_{опт}$ и $P_{рез\ кр} = P_{рес\ кр} = P_{кр}$.

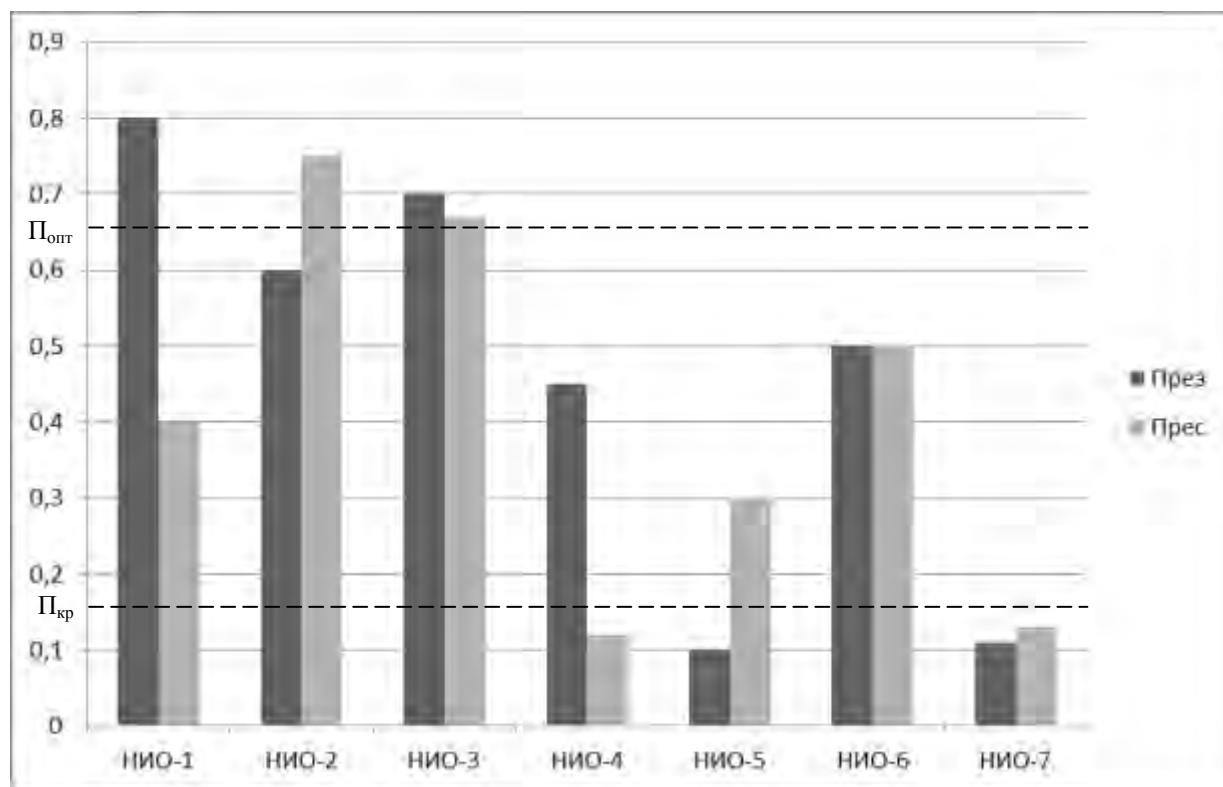


Рис. 2. Категорирование научно-исследовательских организаций по оценкам интегральных показателей

Из рисунка видно, что лидером является НИО-3, хотя по одному из интегральных показателей ее превосходят НИО-1 и НИО-2. Деградирующими являются НИО-4, НИО-5 и НИО-7, причем, если НИО-4 еще может быть «реанимирована» путем развития ресурсной базы, а НИО-5 – путем реорганизации, то последняя является возможным претендентом для ликви-

дации. НИО-1, НИО-2 и НИО-6 являются эффективными, но при этом последняя является сбалансированной, у второй, очевидно, не в полной мере используются имеющиеся ресурсы, а для НИО-1 характерна «работа на износ», что также является недостатком, поскольку обычно ведет к скорому снижению результативности.

Необходимо отметить, что подобным образом НИО могут сравниваться не только по интегральным, но и по групповым и даже частным показателям эффективности. Если же необходимо проанализировать эффективность научной деятельности одной отдельно взятой НИО, то это удобно делать по диаграммам лепесткового типа. Например, на рис. 3 представлен вариант визуализации оценочных значений групповых показателей результативности и ресурсоемкости для отдельной НИО с помощью лепестковой диаграммы, на которой нанесены также границы, соответствующие критическим и оптимальным значениям этих показателей. Диаграмма наглядно показывает, что оценки показателей P_3 и P_8 ниже критического уровня, а для P_1 , P_4 , и P_7 значения выше оптимальных. Информация подобного рода будет полезна не только для вышестоящих ОВУ, но и для непосредственных руководителей НИО, поскольку позволит выяснить причины, например, низких оценочных значений интегральных показателей: двигаясь по иерархической системе показателей сверху вниз, можно легко определить те исходные данные, значения которых являются решающими по воздействию на чувствительность показателей более высоких уровней.

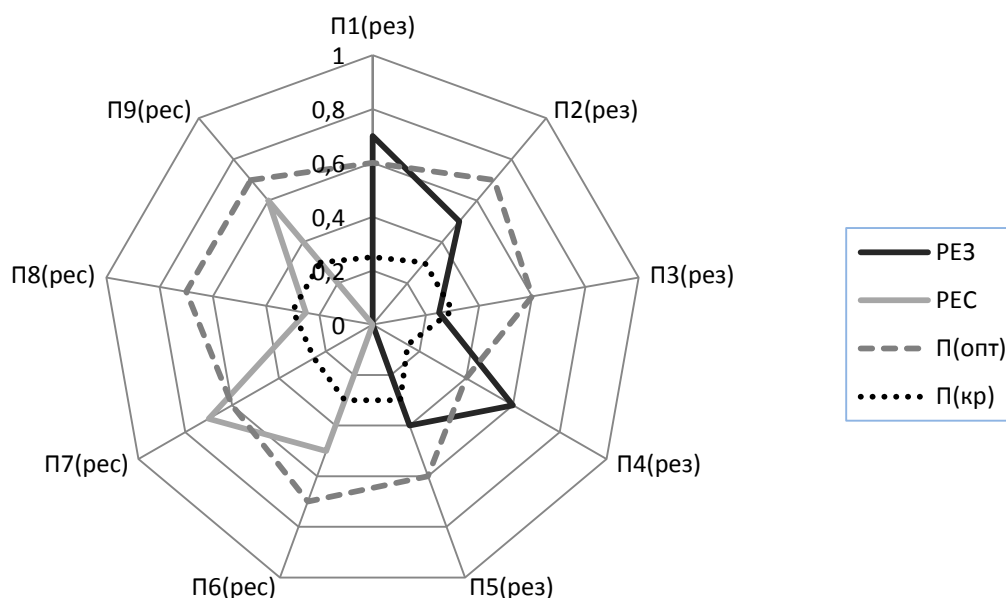


Рис. 3. Оценочные значения групповых показателей эффективности научной деятельности научно-исследовательской организации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задач по реформированию военно-научного комплекса обусловлено необходимостью создания современной методической базы, связывающей единым замыслом и методологией оценивание эффективности научной работы на всех уровнях: военно-научного комплекса ВС РФ; НИО ВС РФ; научных работников НИО.

Необходимо отметить, что оценивание научной работы, то есть по сути творческого процесса, в силу объективных причин не может быть полностью формализованной процедурой. Любое действие, направленное на ранжирование НИО по эффективности научной деятельности, бесспорно, вызовет как недовольство «отстающих», так и во многом справедливую

критику используемого «инструментария», независимо от сложности и адекватности используемых моделей. Поэтому ОВУ при использовании предлагаемого подхода не следует делать категоричных выводов, а результаты оценивания использовать лишь как основание для дальнейшего количественного и качественного ситуационного анализа.

Предлагаемый методический подход предусматривает использование открытой системы показателей, что означает, с одной стороны, постепенный, итеративный процесс ее «настройки» и, с другой стороны, возможность корректировки в дальнейшем как за счет обоснованного изменения состава показателей нижних уровней, так и за счет уточнения их предельных значений и коэффициентов весомости. Это обстоятельство позволяет предполагать, что он может быть использован в качестве основы для разработки соответствующей методики, которая позволит решать ряд актуальных управленческих практических задач:

- выполнять мониторинг эффективности научной (научно-технической) деятельности НИО с целью получения постоянной информации о динамике этих процессов;
- оценивать эффективность научной деятельности НИО по итогам отчетного периода и осуществлять их категорирование с целью разработки соответствующих программ развития, оптимизации сети научных организаций, определения объемов финансирования деятельности НИО и т.п.;
- формировать обоснованные планы научной работы ВС РФ на календарный год и плановый период;
- обосновывать направления развития и совершенствования военно-научного комплекса ВС РФ в целом.

Список используемых источников

1. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. – М.: Советское радио, 1973. – 440 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1971. – 552 с.
3. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – МО СССР, 1989. – Ч.1: Методология, методы, модели. – 660 с.
4. Москвин Б.В. Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 364 с.
5. Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники. – МО СССР, 1990. – Ч.1: Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. – 522 с.
6. Каспаров В.Б., Морозов О.С. Методический аппарат оценки эффективности научно-исследовательских организаций (учреждений) и научных работников Министерства обороны Российской Федерации. – МО РФ, 2017. – 285 с.

Д.Д. Зыков,
кандидат военных наук;
В.П. Махонько,
доктор военных наук, доцент
ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулёва, г. Санкт-Петербург;
А.Б. Спесивцев;
Д.В. Шувалов,
кандидат техн. наук
ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулёва, г. Санкт-Петербург

ОБОСНОВАНИЕ МЕР ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТРАНСПОРТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА И ВОИНСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Значительный объем воинских перевозок в период непосредственной угрозы агрессии и в военное время будет выполняться по железной дороге. В этих условиях важное значение приобретает использование современных технологий при мониторинге транспортной сети, а также перевозочных процессов в интересах обеспечения развертывания группировок войск (сил). В публикации раскрываются пути совершенствования транспортного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации на основе спутникового мониторинга инфраструктуры железнодорожного транспорта и воинских перевозок.

Ключевые слова: транспортное обеспечение, спутниковый мониторинг, железнодорожный транспорт, воинские перевозки.

Как известно, транспорт общего пользования играет значительную роль в обеспечении обороноспособности государства. Это обусловлено тем, что в случае возникновения угрозы агрессии против России необходимо будет выполнять большие по объему воинские перевозки. Надежное обеспечение транспортных потребностей Вооруженных Сил Российской Федерации возможно при условии устойчивого функционирования транспортного комплекса страны, постоянного совершенствования и развития всей системы транспортного обеспечения национальной безопасности государства. Своевременное реагирование на угрозы срыва воинских перевозок, принятие мер по предотвращению и нейтрализации дезорганизации перевозочного процесса – это одна из сложных проблем в работе органов военных сообщений и органов управления железнодорожным транспортом.

Следует отметить, что значительный объем воинских перевозок в период непосредственной угрозы агрессии и в военное время будет выполняться по железной дороге. Даже сейчас, в мирное время, объем воинских оперативных перевозок составляет значительную часть от общего объема воинских железнодорожных перевозок. При этом большая часть оперативных перевозок связана с проводимыми в настоящее время мероприятиями по боевой подготовке войск. В этих условиях важное значение приобретает использование современных технологий при мониторинге инфраструктуры железнодорожного транспорта и воинских перевозок в интересах обеспечения развертывания группировок войск (сил). При этом органам военного управления представляется важным знать как текущее состояние технической базы объектов железнодорожного транспорта, особенно на барьерных рубежах, так и динамику изменения транспортной обстановки на железнодорожных направлениях перевозки войск и перспективу ее развития.

Железнодорожное направление перевозки войск как военно-транспортная логистическая система представляет собой сложную, открытую, устойчивую, управляемую, координируе-

мую систему с имманентными целями элементов (подсистем), функционирование которой направлено на достижение гарантированного обеспечения потребности Вооруженных Сил в перевозках и средствах транспорта. Эта система включает в себя следующее:

- железнодорожные участки и станции, относящиеся к инфраструктуре железнодорожного транспорта;
- подвижной состав, тяговые средства, перевозимые войска, непосредственно образующие военно-транспортные потоки;
- командование, штабы, службы перевозимых войск, органы военных сообщений и органы управления на железнодорожном транспорте, выполняющие функции управления перевозками;
- организации и подразделения железнодорожного транспорта, железнодорожные войска, спецформирования, обеспечивающие эксплуатацию и восстановление железных дорог.

Железнодорожное направление обладает стройной внутренней иерархической структурой, взаимодействующей с внешней средой и предназначенной для достижения такой цели, как выполнение заданных объемов перевозок войск в установленные командованием сроки.

Вместе с тем накопленный опыт, выполненные исследования и существующая практика организации воинских перевозок позволяют утверждать, что информационная обеспеченность всех уровней управления воинскими перевозками – от стратегического, оперативного до тактического – в настоящий момент недостаточна. Это обусловлено несоответствием уровня качества мониторинга инфраструктуры железнодорожных направлений перевозки войск и самого перевозочного процесса предъявляемым требованиям к управлению воинскими перевозками. Так, непосредственно мониторинг состояния технической базы и самого процесса выполнения воинских перевозок осуществляется линейными органами военных сообщений и органами управления на железнодорожном транспорте. При этом сбор, обработка и передача информации об изменении параметров технической базы и показателей перевозочного процесса, вызванном чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера, осуществляется последовательно на различных уровнях управления воинскими перевозками (от низшего уровня управления к высшему). Таким образом, для доведения объективной информации до центрального пункта управления воинскими перевозками требуется достаточно большое время. Тем самым в недостаточной степени обеспечивается такое требование к управлению воинскими перевозками, как оперативность. Естественно, это негативным образом сказывается на условиях эксплуатационной работы, при которых возможны срывы сроков доставки войск в районы оперативного предназначения. Избежать такого рода ситуаций возможно при условии своевременной оценки транспортной обстановки. Исходя из этого, для органов военного управления и органов управления железнодорожным транспортом крайне актуальным представляется ее постоянный мониторинг. Одним из наиболее перспективных способов получения оперативной информации о состоянии инфраструктуры железнодорожного направления, воинских поездопотоков и общего характера эксплуатационной работы является космическое зондирование.

Таким образом, весьма актуальной представляется задача разработки структуры и содержания специального геоинформационного обеспечения для управления воинскими перевозками в условиях развертывания группировок войск (сил), которое позволит оценивать текущее состояние и динамику изменения транспортной обстановки, возможность прогнозирования критических ситуаций в эксплуатационной работе, обеспечит поддержку управленческих решений по их предупреждению. Исполнение данной задачи должно предусматривать следующий комплекс мероприятий:

- проведение межведомственной интеграции исследований научных и учебных организаций в области организации воинских перевозок, строительства и эксплуатации железнодорожного транспорта и применения спутниковых технологий;
- формирование единого информационного поля системы воинских железнодорожных перевозок в интересах транспортного обеспечения ВС РФ;

- формирование телекоммуникационной среды системы воинских железнодорожных перевозок в интересах транспортного обеспечения ВС РФ;
- обеспечение информационной безопасности единого информационного пространства воинских железнодорожных перевозок в интересах транспортного обеспечения ВС РФ;
- разработку концепции межведомственной интегрированной автоматизированной системы управления воинскими железнодорожными перевозками в интересах транспортного обеспечения ВС РФ.

Основными стратегическими целями создания системы мониторинга инфраструктуры железнодорожного транспорта и воинских перевозок в интересах транспортного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации, являются:

- повышение качества планирования и оперативного управления перевозочным процессом на железнодорожных направлениях перевозки войск;
- оптимизация распределения имеющихся сил и средств для поддержания требуемого уровня устойчивости функционирования инфраструктуры железнодорожных направлений перевозки войск.

Необходимость межведомственной интеграции обусловлена узкой специализацией собственных интеллектуальных и технологических ресурсов органов управления и организаций различных ведомств, задействованных в обеспечении выполнения воинских железнодорожных перевозок, применении спутниковых технологий (Генерального штаба ВС РФ, Национального центра управления обороной РФ, Воздушно-космических сил РФ, Железнодорожных войск РФ, Департамента транспортного обеспечения МО РФ, Минтранса России, ОАО РЖД). Это требует объединения усилий специалистов, а также создания интегрированного интеллектуального капитала.

Железнодорожные направления, используемые для перевозки войск, представляют собой сложную геотехническую систему. Управление такой системой в современных условиях возможно только на основе формирования единого информационного поля. Оно должно объединять различные базы данных и информационные потоки (оперативную и прогнозную информацию органов военного управления, оперативную информацию диспетчерских служб, информационные потоки спутниковых навигационных систем, текущую и прогнозную оценку транспортной обстановки).

Основой создания единого информационного поля являются телекоммуникационные системы. В совокупности они дают возможность интеграции данных в единую систему и тем самым обеспечивают возможность комплексного использования всей информации. Интеграция различных информационных потоков и баз данных, внедрение прогнозных математических моделей погрузки, движения и выгрузки поездов с воинскими эшелонами и воинскими грузами, а также научно-методического аппарата оценки и прогнозирования военно-эксплуатационной работы позволит создать общую информационную основу единого информационного пространства.

На основе определения прогнозных значений показателей военно-эксплуатационной работы становится возможным оперативное реагирование на любые изменения обстановки, заключающееся в своевременном проведении регулировочных мероприятий, которые направлены на выполнение плановых объемов воинских перевозок в установленные командованием сроки. Для обеспечения возможности приведения в соответствие прогнозных и плановых параметров транспортных потоков на железнодорожных направлениях, используемых для перегруппировок войск, предлагается метод комплексной оценки и прогнозирования военно-эксплуатационной работы на элементах железнодорожного направления перегруппировки войск.

Предлагаемый метод заключается в конкретизации уравнения синтеза облика системы и способов ее использования. При этом конкретизация осуществляется за счет преобразования базовой зависимости к конечноразностной схеме применительно к перевозочному процессу на железнодорожном направлении:

$$I_l^K(T) = \int_{t_H}^{t_K} K_l(t) \cdot p_l^k(t) \cdot \lambda_{\text{пост}}^k(t) dt \quad (1)$$

- где
- k – вид транспортного потока;
 - l – элемент железнодорожного направления перегруппировки войск, $l=1, 2, \dots, L$;
 - t_H, t_K – время начала, окончания выполнения перевозки войск;
 - K_l – обобщенный коэффициент соответствия производственных мощностей l -го элемента железнодорожного направления интенсивности поступления ТП, ед;
 - I_l^K – показатель эффективности функционирования железнодорожного направления по обслуживанию k -го ТП;
 - p_l^k – вероятность обслуживания k -го ТП на l -м элементе железнодорожного направления;
 - $\lambda_{\text{пост}}^k$ – интенсивность поступления ТП на l -й элемент железнодорожного направления.

Обобщенный коэффициент K_l (1) формируется на основе частных коэффициентов, характеризующих уровень соответствия технической базы l -го элемента железнодорожного направления потребной интенсивности обслуживания k -го ТП:

$$K_l(t, t_K) = \prod_{g=1}^G K_{lg}(t, t_K), \quad (2)$$

где g – признак, характеризующий вид производственной мощности элемента железнодорожного направления.

Частные коэффициенты соответствия элементов определяются как отношения имеющихся производственных мощностей к потребным, определяемым исходя из текущих интенсивностей поступления ТП:

а) для железнодорожных участков базирования районов погрузки (выгрузки) войск:

$$K_E(t) = \frac{E(t)}{E_{\text{п(в).потр}}(t)}; \quad (3)$$

$$K_N(t) = \frac{N(t)}{N_{\text{потр}}(t)}, \quad (4)$$

$$E_{\text{п.потр}}(t) = \sum_{K_B} \lambda_{\text{п.план}}^{k_B}(t); \quad (5)$$

$$E_{\text{в.потр}}(t) = \sum_{K_B} \lambda_{\text{в.план}}^{k_B}(t); \quad (6)$$

$$N_{\text{потр}}(t) = \sum_K \lambda_{\text{пост}}^k(t), \quad (7)$$

б) для железнодорожных участков продвижения воинских эшелонов:

$$K_N(t) = \frac{N(t)}{N_{\text{потр}}(t)}, \quad (8)$$

в) для технических станций:

$$K_N(t) = \frac{N(t)}{N_{\text{потр}}(t)}; \quad (9)$$

$$N_{\text{потр}}(t) = \sum_{K_{\text{пр}}} \lambda_{\text{пост}}^{k_{\text{пр}}}(t); \quad (10)$$

$$K_P(t) = \frac{P(t)}{P_{\text{потр}}(t)}; \quad (11)$$

$$P_{\text{потр}}(t) = \sum_{P_{\text{пер}}} \lambda_{\text{пост}}^{k_{\text{пер}}}(t), \quad (12)$$

- где E – погрузочная (выгрузочная) способность железнодорожного участка базирования района погрузки (выгрузки) войск;
- $E_{\text{п.потр}}$ – потребная погрузочная (выгрузочная) способность железнодорожного участка базирования района погрузки (выгрузки) войск;
- N – пропускная способность железнодорожного участка базирования района погрузки (выгрузки) войск, железнодорожного участка продвижения воинских эшелонов, технической станции;
- $N_{\text{потр}}$ – потребная пропускная способность железнодорожного участка базирования района погрузки (выгрузки) войск, железнодорожного участка продвижения воинских эшелонов, технической станции;
- P – перерабатывающая способность технической станции;
- $P_{\text{потр}}$ – потребная перерабатывающая способность технической станции;
- $\lambda_{\text{п.план}}^{k_{\text{в}}}$ – планируемая интенсивность погрузки k -го воинского поездопотока (определяется исходя из данных мониторингового контроля перевозочного процесса);
- $\lambda_{\text{в.пост}}^{k_{\text{в}}}$ – интенсивность поступления под выгрузку k -го воинского поездопотока (определяется исходя из данных мониторингового контроля перевозочного процесса);
- $\lambda_{\text{пост}}^k$ – интенсивность поступления k -го транспортного потока (определяется исходя из данных мониторингового контроля перевозочного процесса);
- $\lambda_{\text{пост}}^{k_{\text{пр}}}$ – интенсивность поступления k -го транспортного потока под пропуск на техническую станцию (определяется исходя из данных мониторингового контроля перевозочного процесса);
- $\lambda_{\text{пост}}^{k_{\text{пер}}}$ – интенсивность поступления k -го транспортного потока под переработку на техническую станцию (определяется исходя из данных мониторингового контроля перевозочного процесса).

Определение вероятности обслуживания транспортного потока p_l^k осуществляется на основе специального математического аппарата с учетом установленной органами управления приоритетности обслуживания поездопотоков, вагонопотоков на железнодорожном направлении.

В рамках метода оценивания эффективности функционирования элементов железнодорожного направления первоначально решается задача оптимального управления при $K_l(t)=1$. При этом имеется вектор-функция управления, характеризуемая таким элементом, как интенсивности поступления транспортных потоков на l -й элемент железнодорожного направления (λ_l^k), и вектор-функция траектории развития системы, характеризуемая таким элементом, как вероятность обслуживания транспортных потоков p_l^k . Пара этих двух вектор-функций представляет собой управляемый процесс. Задача оптимального управления сводится к обоснованию оптимального управляемого процесса, то есть к определению подозрительных на оптимальность значений λ_l^{*k} и p_l^{*k} . Переход от значений интенсивностей поступления транспортных потоков, определенных применительно к нормальным условиям эксплуатационной работы ($K_l(t)=1$), к значениям, отвечающим условиям изменяющейся обстановки ($K_l(t)<1$), осуществляется на основе следующей зависимости:

$$\Delta\lambda_l^{*k}(t) = \frac{\Delta K_l(t)\lambda_l^{*k}(t)}{1 - \Delta K_l(t)}. \quad (13)$$

Зависимость (13) определяет необходимый уровень увеличения интенсивности поступления транспортных потоков для компенсации изменения коэффициентов соответствия элементов железнодорожного направления перевозки войск (K_l).

Разработанный метод позволяет оценивать эффективность функционирования элементов железнодорожного направления в различных условиях оперативно-стратегической обстановки. При этом оценивание предполагает следующее:

- формализацию процесса обслуживания транспортных потоков в рамках теории нестационарных потоков Пуассона по показательному закону с переменной интенсивностью;
- разработку аналитической модели оптимального управления транспортными потоками на железнодорожном направлении перегруппировки войск;
- обоснование требуемого значения показателя эффективности функционирования железнодорожного направления.

Практическая значимость метода состоит в возможности объективной, взаимосвязанной оценке производственных мощностей элементов железнодорожного направления при различных вариантах технологических условий их эксплуатационной работы, определяемых в результате мониторинга инфраструктуры и хода перевозочного процесса. На этой основе станет возможен выход на новый уровень системного анализа информации, что, в свою очередь, обеспечит повышение качества планирования и оперативного управления перевозочным процессом.

Внедрение математических моделей в области прогнозирования воздействия противника по объектам железнодорожного транспорта, применения соединений и частей Железнодорожных войск, спецформирований железнодорожного транспорта позволят реализовать вторую цель создания системы, заключающуюся в распределении имеющихся сил и средств для поддержания требуемого уровня живучести инфраструктуры железнодорожных направлений.

Управление состоянием инфраструктуры железнодорожного транспорта и ее эксплуатационной работой основывается на своевременном и всестороннем учете прямых и обратных связей между взаимодействующими элементами системы. Исходя из этого, достижение поставленных стратегических целей представляется целесообразным на основе использования геоинформационных технологий. Применение геоинформационного подхода вызвано необходимостью выявления и использования пространственных взаимосвязей между различными объектами на железнодорожных направлениях перевозки войск в динамично изменяющихся условиях эксплуатационной работы. Кроме того, геоинформационные технологии позволяют обеспечить визуализацию транспортной обстановки, что существенным образом сказывается на повышении качества анализа и оперативности принятия совместных управленческих решений органами военного управления и органами управления на железнодорожном транспорте.

В совокупности новые технологические решения и разработанный в настоящее время научно-методический аппарат позволят создать интегрированную систему управления, основой которой является интегрированная геоинформационная среда и система мониторинга. Интегрированная геоинформационная среда должна базироваться на модели геоданных, ядром которой являются данные спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

В настоящее время технология ГЛОНАСС/GPS и системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сочетании с подвижной спутниковой связью уже широко используются в целях получения координатной информации об объектах железнодорожного транспорта. Обмен информацией со спутниками ДЗЗ в России осуществляет НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы», в цифровом архиве которого хранятся данные, полученные как с отечественных, так и иностранных КА с 1990 г. и по настоящее время. Данные, получаемые с

аппаратуры спутников ДЗЗ, обладают оперативностью (съемка начинается в день получения задания), обзорностью съемки и наглядностью представления. Так, современные КА имеют пространственное разрешение от 0,3 до 1 м, что позволяет получить снимки с высокой степенью детальности и информативности [10].

Новый подход приведет к возникновению синергетического эффекта и достижению лучшего качества управления воинскими железнодорожными перевозками. Применение геоинформационных технологий обеспечит реализацию оперативного сбора, обработки и наглядного представления пространственной и временной информации о погрузке, движении и выгрузке поездов с воинскими эшелонами, возникновении барьерных мест, изменении параметров инфраструктуры железнодорожных направлений, наличии и расположении сил и средств по обеспечению живучести объектов железнодорожного транспорта. Использование этой информации представляется наиболее эффективным на пунктах управления Национального центра управления обороной РФ, Управления военных сообщений Департамента транспортного обеспечения МО РФ. При этом предлагаемая интегрированная система мониторинга инфраструктуры железнодорожных направлений и воинских перевозок должна также основываться и на данных, поступающих от автоматизированной системы управления железнодорожным транспортом (при условии соблюдения требований защиты информации) и составляющих ее информационных систем.

Экономическую эффективность внедрения предлагаемой системы обеспечит следующее:

- сокращение эксплуатационных расходов, связанных с простоями воинских и других категорий поездов перед барьерными рубежами;
- сокращение эксплуатационных расходов, связанных с простоями воинских и других категорий поездов в результате возникновения так называемых «пробок» на железнодорожных направлениях перевозки войск;
- сокращение парка тяговых средств, задействованного для выполнения воинских перевозок;
- ускорение высвобождения парка подвижного состава под погрузку соединений и частей;
- сокращение объемов материально-технических ресурсов, необходимых для выполнения воинских перевозок.

Основная оперативная эффективность предлагаемой системы будет заключаться в сокращении сроков принятия решений по управлению перевозочным процессом и применению соединений и частей Железнодорожных войск РФ, спецформирований железнодорожного транспорта. Это будет достигаться за счет того, что информация об изменении параметров технической базы и показателей перевозочного процесса будет поступать сразу непосредственно в центральный пункт управления без последовательной обработки на низших уровнях управления. Конечно же, поступающая информация должна будет уточняться и детализироваться линейными органами военных сообщений. Вместе с тем при таком подходе Управление военных сообщений Департамента транспортного обеспечения МО РФ может незамедлительно приступить к разработке мероприятий по регулированию воинских перевозок. Это положительным образом скажется на сокращении сроков выполнения воинских перевозок в условиях дезорганизации перевозочного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье подход к совершенствованию транспортного обеспечения на основе спутникового мониторинга инфраструктуры и воинских перевозок позволит обеспечить устойчивое функционирование железнодорожной транспортной системы, заключающееся в ее способности сохранять или быстро восстанавливать перевозочные функции в условиях чрезвычайных ситуаций техногенного и военного характера с целью удовлетворения транспортных потребностей государства и Вооруженных Сил Российской Федерации.

Список используемых источников

1. Справочник по математике для экономистов / В.Е. Барбаумов, В.И. Ермаков, Н.Н. Кривенцова и др. – М.: Высшая школа, 1987. – 336 с.
2. *Шувалов Д.В.* Обеспечение устойчивости объектов транспортного комплекса за счет усовершенствования способа транспортировки сборно-разборных консольных кранов СРК-50, СРК-70 // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 11–12 (89–90). – С. 133–136.
3. *Лагунов С.А., Зорин В.И.* О совершенствовании проверки проектов технических условий при перевозке грузов железнодорожным транспортом // Военная мысль. – 2019. – № 3. – С. 62–65.
4. *Феллер Г.М.* Живучесть железных дорог как фактор устойчивости транспортного обеспечения Вооруженных Сил // Военная мысль. – 2019. – № 2. – С. 67–63.
5. *Топоров А.В., Бычков А.В., Тулинов А.И.* Направления совершенствования системы материально-технического обеспечения коллективных сил оперативного реагирования Организации договора о коллективной безопасности // Военная мысль. – 2018. – № 6. – С. 42–43.
6. *Шувалов Д.В., Фискевич А.С.* Планирование применения техники длительного хранения как основа успешного выполнения задач обеспечения государственной безопасности // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. СПб. – 2015. – № 7–8 (85–86). – С. 70–75.
7. *Соколов В.В., Кавецкий В.Н., Махонько В.П.* Состояние и проблемы организации воинских железнодорожных перевозок // Военная мысль. – 2012. – № 7. – С. 59–65.
8. *Махонько В.П., Шувалов Д.В.* Единое железнодорожное пространство государств - участников ОДКБ как одна из основ эффективного применения войск (сил) в интересах обеспечения коллективной безопасности // Вестник Академии военных наук. – 2018. – № 4. – С. 71–76.
9. *Шувалов Д.В.* Альтернативный подход к обеспечению устойчивости объектов Министерства обороны (баз хранения) при использовании инновационных технических решений. // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – № 3–4. – С. 81–87.
10. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М., ИКИ РАН.

А.П. Алёшкин,
доктор техн. наук, профессор;
К.В. Бакурский,
кандидат техн. наук;
В.И. Невзоров,
кандидат техн. наук, доцент;
П.В. Савочкин,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ

Работа посвящена анализу способов адаптации внешних параметров и характеристик антенной решетки радиолокационной станции (РЛС) в интересах компенсации искажений волнового фронта падающей электромагнитной волны, вызванных влиянием среды распространения.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка радиолокационных систем, компенсация искажения волнового фронта.

В настоящее время вопросы радиолокационного мониторинга приобретают всё большую актуальность. Однако радиолокация объектов, находящихся на значительных расстояниях, а также за линией горизонта, связана с рядом трудностей. С одной стороны, на точность получения радиолокационной информации об объекте влияет среда распространения, вносящая случайные ошибки, с другой – энергетика и структура радиоканала, которая также связана с параметрами среды. При использовании в РЛС в качестве антенной системы фазированной решетки искажения волнового фронта принимаемого сигнала приводят к несогласованности его фазовых характеристик с амплитудно-фазовым распределением на апертуре в отсутствие искажений, что приводит к смещению максимума диаграммы направленности антенной решетки (АР) в режиме приема и не соответствует направлению на источник отраженного сигнала.

Параметры среды распространения изменяются случайным образом. Наблюдаются изменения волнового фронта распространяющейся и отраженной радиоволны и соответствующее изменение амплитудно-фазового распределения на апертуре АР. При этом искажение фазы приходящей волны на 5° приводит к погрешности определения угловых координат более чем на 1° и соответствует значительному уменьшению вероятности обнаружения цели [1]. В связи с этим компенсация искажения падающего на АР волнового фронта, приводящая к повышению вероятности обнаружения цели, и является актуальной задачей.

Рассмотрим влияние среды распространения на искажения фазового распределения принимаемого поля на апертуре АР РЛС дециметрового диапазона, обладающей возможностью лоцирования объектов за линией горизонта.

В нашей стране в РЛС дециметрового диапазона антенные системы построены на основе линейных АР, элементами которых являются вибраторные антенны [1]. В связи со спецификой данного диапазона волн и требуемой разрешающей способностью радиолокационной станции по угловым координатам данные антенные решетки имеют достаточно большие линейные размеры. Однако такое построение антенн не позволяет одновременно определять полный вектор состояния объектов, находящихся в зоне ответственности РЛС. В частности, отсутствуют сведения об угле места прихода сигнала, что существенно снижает информативность радиолокационных данных. Это связано со сложностью построения АР такого диапазона, которая должна иметь большие размеры не только в горизонтальной, но и в

вертикальной плоскости. Одним из вариантов решения указанной проблемы является использование кольцевой АР.

Кольцевые антенные решетки получили широкое распространение как в радиолокации, так и в пеленгации и навигации [2, 3]. По принципу построения такие АР в общем случае не отличаются друг от друга. Причем максимумы ДН отдельных элементов таких решеток направлены по нормали от центра решетки. В силу специфики решаемых задач АР декаметрового диапазона, как правило, работают в одной полусфере при достаточно малых углах места. Отличие рассматриваемой кольцевой АР от «классической» состоит в том, что максимум диаграммы направленности (ДН) отдельных элементов направлен в одну сторону, допустим под некоторым углом к плоскости XOY , а не по нормали от центра решетки (рис. 1), так как обычно сектор сканирования таких антенн ограничивается одной полусферой.

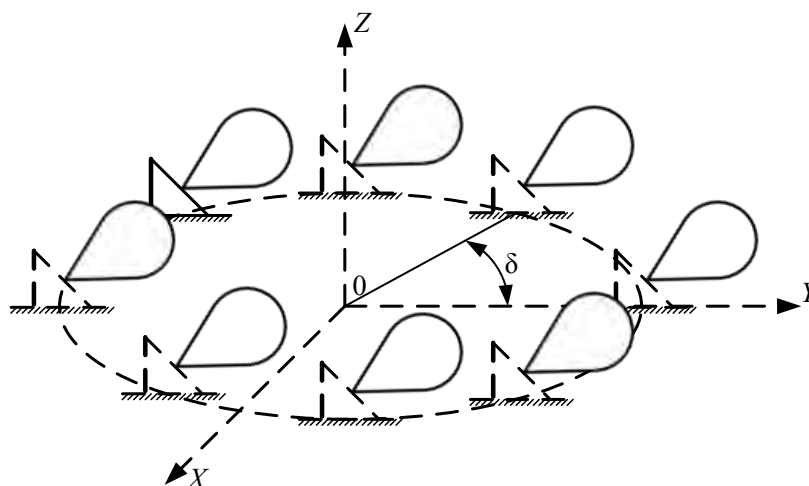


Рис. 1. Направление диаграмм направленности элементов кольцевой антенной решетки

Применение кольцевых АР обусловлено, во-первых, необходимостью обеспечения разрешающей способности наряду с азимутом и по углу места, что нельзя обеспечить с помощью линейных АР, во-вторых, ее параметры не зависят от исходного направления фазирования по азимуту и углу места, так как такая решетка является неэквидистантной при приеме волны с произвольного направления, в отличие от других типов АР.

Существенное влияние на качество получаемой информации от наблюдаемого объекта оказывает среда распространения, а именно, ионосфера. В результате прохождения электромагнитной волны через ионосферу, являющуюся неоднородной анизотропной средой, происходит искажение волнового фронта. Компенсация искажений является сложной задачей, так как обнаружение и учет влияния неоднородностей на трассе распространения сигнала не всегда возможны. В результате в измерениях будут присутствовать ошибки, ухудшающие качество радиолокационной информации, которые необходимо устранить в процессе обработки. При этом крупномасштабные и среднемасштабные неоднородности в ионосфере вносят линейные искажения, а мелкомасштабные, в силу больших продольных размеров АР – могут вносить искривления волнового фронта квадратичного, кубического и более высоких порядков.

Известен характер искажения характеристики направленности антенн при отклонении волнового фронта от плоского. Линейные искажения, одинаковые по всей апертуре АР, вызывают отклонение максимума диаграммы направленности. Искажения высших порядков приводят к искажению формы ДН и снижению энергетических характеристик, тем самым уменьшая дальность действия РЛС.

Кольцевая АР может быть представлена эквивалентной линейной структурой [2], которая является неэквидистантной. Причем на ее краях элементы расположены чаще, чем по сере-

дине. Поэтому влияние искажения волнового фронта на параметры и характеристики такой АР будет отличаться от классических решеток.

Рассмотрим кольцевую АР. В качестве ее элементов будем использовать облучатель, ДН которого в угломестной плоскости должна иметь ширину, не превышающую 90° , а в азимутальной плоскости -180° . Необходимо обеспечить ноль диаграммы при углах, близких к горизонту. Одним из возможных вариантов реализации такой ДН может быть применение элементов АР типа «наклонный луч», характеристика направленности которой приближенно определяется выражением

$$F_1(\theta, \phi) = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \frac{(1 + \cos \phi)}{2} \sin(2\theta). \quad (1)$$

где θ, ϕ – соответственно угол места и азимута направления в пространстве.

Вид ДН одиночного элемента представлен на рис. 2.

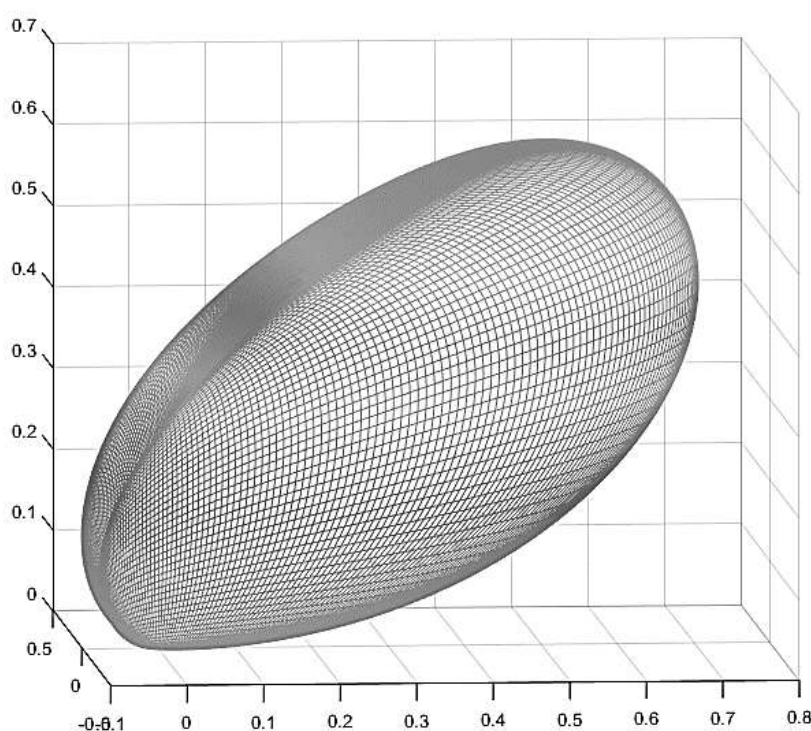


Рис. 2. Диаграмма направленности одиночного излучателя

Характеристика направленности кольцевой АР, сфазированной при приеме сигнала с направления θ_0, ϕ_0 , описывается следующим выражением [2]:

$$\dot{f}_0(\theta, \phi) = F_1(\theta, \phi) \sum_{i=1}^n \exp \{ -jkR[\cos(\phi - i\delta) \cos \theta + \cos(\phi_0 - i\delta) \cos \theta_0] \}, \quad (2)$$

где $F_1(\theta, \phi)$ – нормированная характеристика направленности одиночного излучателя;

i – номер излучателя;

n – количество элементов решетки;

δ – угол между соседними элементами решетки;

θ_0, ϕ_0 – соответственно угол места и азимута направления фазирования АР.

Нормированная амплитудная ДН такой АР в соответствии с выражением (1) (имеющая параметры: число элементов решетки $n = 20$; длина волны $\lambda = 100$ м; радиус образующей кольцевой решетки $R_0 = 2\lambda$; $\theta_0 = 50^\circ$; $\phi_0 = 0$) представлена на рис. 3.

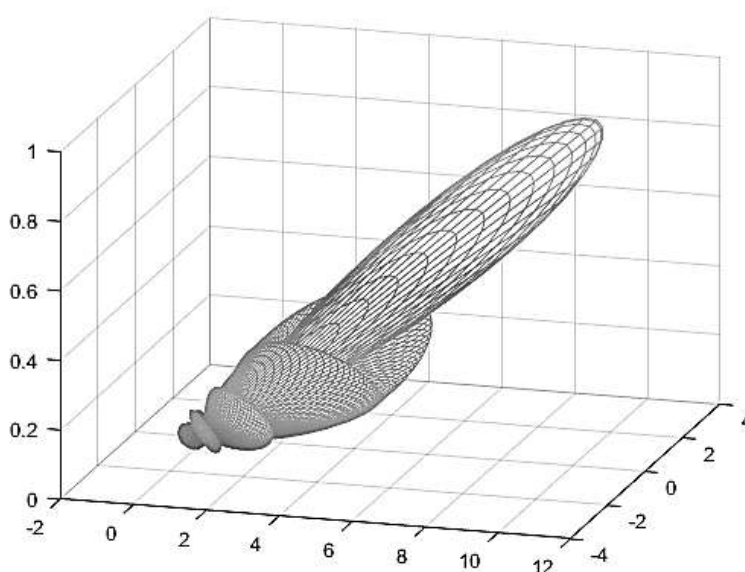


Рис. 3. Диаграмма направленности кольцевой антенной решетки

Сформированное фазовое распределение на выходе элементов АР будет определяться выражением

$$\psi_i(\theta, \phi) = -kR \cos(\phi_0 - i\delta) \cos \theta_0. \quad (3)$$

При отсутствии искажений отраженная от объекта электромагнитная волна имеет плоский волновой фронт. Фазовое распределение фронта волны на элементах решетки с указанными выше параметрами показано на рис. 4 (звездочками обозначено фазовое распределение на элементах АР).

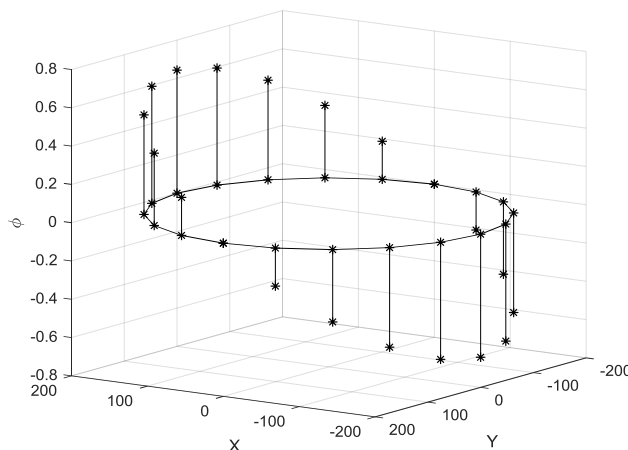


Рис. 4. Фазовое распределение на элементах кольцевой антенной решетки

Искажения волнового фронта, обусловленные средой распространения, приводят к искажениям формы падающей на решетку электромагнитной волны (волновым абберациям), которые можно разложить в степенной ряд по двум ортогональным осям в поперечной плоскости, перпендикулярной исходному направлению фазирования АР.

Одну ось расположим параллельно плоскости XOY (азимутальной плоскости ϕ), а другую – перпендикулярно к данной оси. При этом возникающие отклонения от плоского фронта в фазовом распределении на выходах элементов решетки пропорциональны координатам про-

екции элементов АР на поперечную плоскость и могут быть описаны представленным ниже степенным полиномом:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_i(\phi, \theta) = & a_1 R \sin(\phi_0 - i\delta) + b_1 [R(\sin(\phi_0 - i\delta))]^2 + \\ & + c_1 [R(\sin(\phi_0 - i\delta))]^3 + a_2 R \cos(\phi_0 - i\delta) \sin \theta_0 \dots + \\ & + b_2 [R(\cos(\phi_0 - i\delta) \sin \theta_0)]^2 + c_2 [R(\cos(\phi_0 - i\delta) \sin \theta_0)]^3 + \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

где a, b, c, \dots – коэффициенты полинома, зависящие от состояния среды и длины волны.

Коэффициенты полинома a, b, c в процессе моделирования выбирались из условия, чтобы отклонение максимума основного лепестка ДН не превышало половины его ширины. При дальнейшем увеличении коэффициентов возникает отклонение максимума ДН на величины, недопустимые при работе РЛС, или «развал» ДН.

Откорректированной характеристике направленности кольцевой АР в режиме приема при условии, что на нее падает волна с искаженным волновым фронтом, соответствует выражение

$$\begin{aligned} \hat{f}(\theta, \phi) = & F_1(\theta, \phi) \sum_{i=1}^n \exp[j\Delta\phi_i(\phi, \theta)] \times \\ & \times \exp\{-jkR[\cos(\phi - i\delta)\cos\theta + \cos(\phi_0 - i\delta)\cos\theta_0]\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Линейные искажения, описываемые членами полинома с коэффициентами a , приводят к линейному отклонению волнового фронта, то есть его повороту на некоторый угол и к соответствующему повороту максимума ДН. Квадратичные фазовые искажения, описываемые членами полинома с коэффициентами b , приведут к уменьшению уровня плотности потока мощности при приеме сигнала с исходного направления фазирования АР, кубические, описываемые членами полинома с коэффициентами c – также приводят как к некоторому отклонению максимума ДН, так и к уменьшению уровня мощности сигнала на выходе АР [4, 5].

Для примера, на рис. 5 показано фазовое распределение на элементах решетки (кружками) при линейном искажении волнового фронта в угломестной плоскости θ (коэффициент $a_1 = 0,05$).

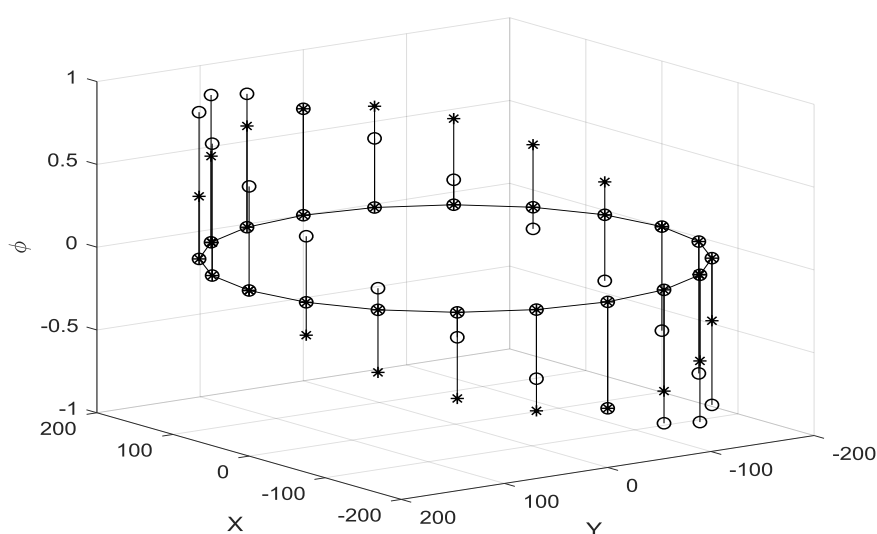


Рис. 5. Фазовое распределение на элементах кольцевой антенной решетки при линейном искажении волнового фронта в угломестной плоскости

На рис. 6 представлено фазовое распределение на элементах решетки (кружками) при линейном искажении волнового фронта в азимутальной плоскости ϕ в режиме приема (коэффициент $a_2 = 0,05$).

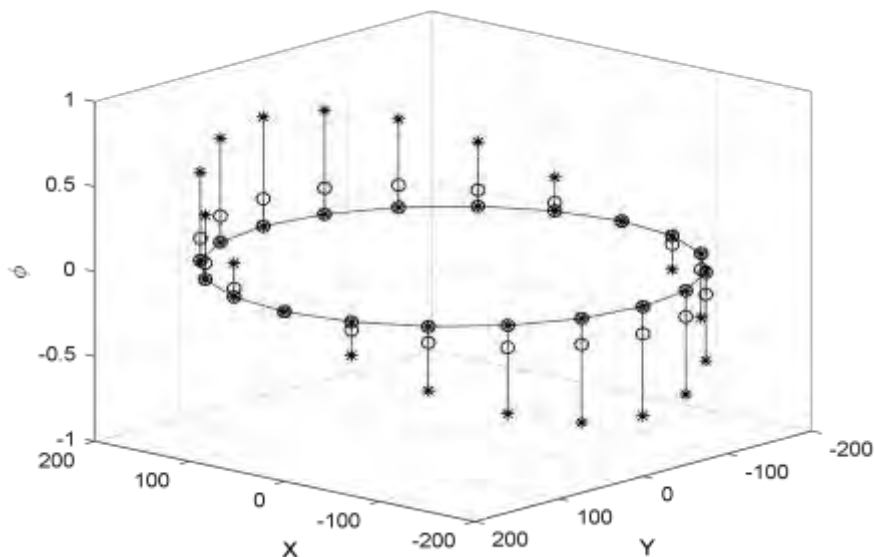
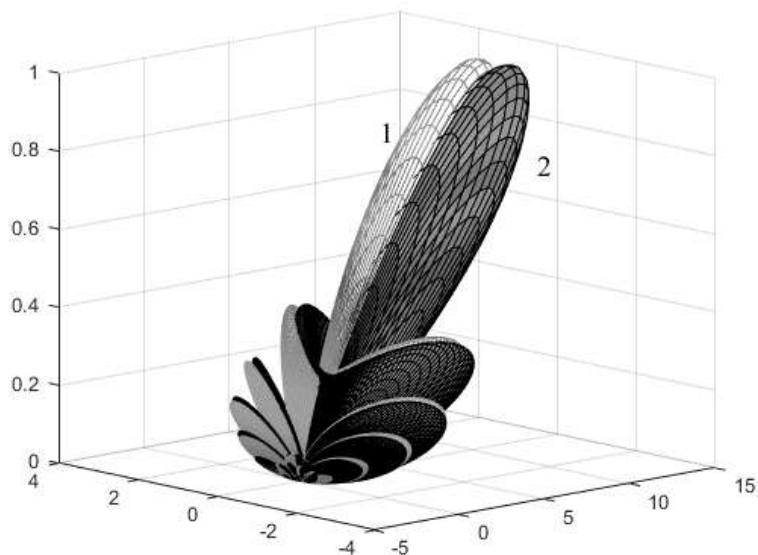


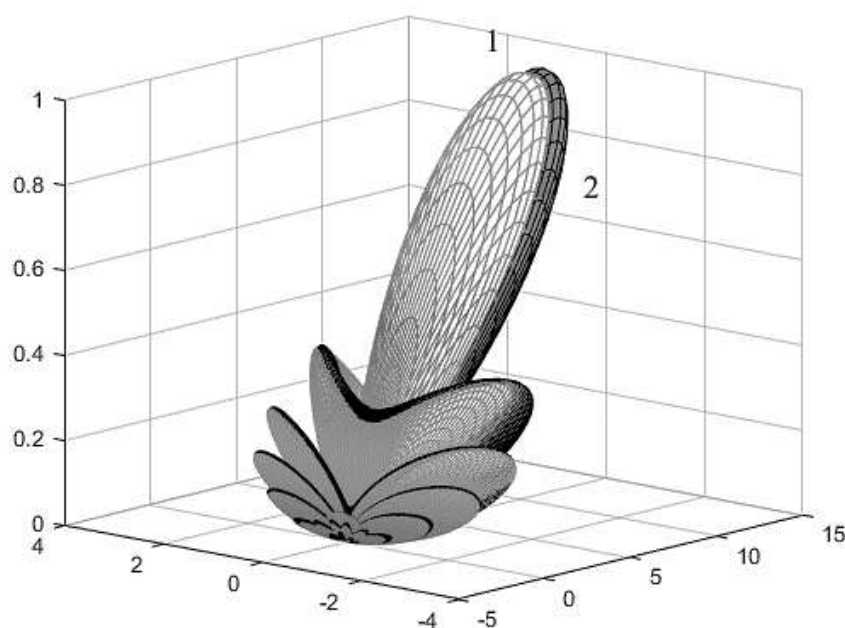
Рис. 6. Фазовое распределение на элементах кольцевой антенной решетки при линейном искажении волнового фронта в азимутальной плоскости

Пространственная ДН при линейном искажении волнового фронта в угломестной плоскости представлена на рис. 7,а, при линейном искажении волнового фронта в азимутальной плоскости – на рис. 7,б.



а)

Рис. 7. Пространственная диаграмма направленности кольцевой антенной решетки для плоской волны (1) и для волны с искаженным фазовым распределением (2) (начало)



б)

Рис. 7. Пространственная диаграмма направленности кольцевой антенной решетки для плоской волны (1) и для волны с искаженным фазовым распределением (2) (окончание)

Из анализа рисунков следует, что линейные небольшие искажения формы волнового фронта в угломестной плоскости кольцевой АР приводят к отклонению максимума ДН в плоскости ϕ и практически не влияют на ДН в плоскости θ . Такие же искажения в азимутальной плоскости приводят к отклонению максимума ДН как в плоскости θ , так и в плоскости ϕ .

В табл. 1, 2 приведены результаты моделирования при различных значениях коэффициентов линейного полинома, т.е. при различных величинах фазовых отклонений волнового фронта.

Таблица 1

Линейное искажение в плоскости θ

a_1	$\Delta\phi, ^\circ$	$\Delta\theta, ^\circ$	$\psi_{\max}, ^\circ$
0	0	0	0
0,01	0	1,005	5,515
0,02	0	1,005	11,031
0,03	0	2,011	16,546
0,04	0	2,011	22,062
0,05	0	3,016	27,577
0,06	0	3,016	33,093
0,07	0	4,022	38,608
0,08	0	4,022	44,124
0,09	0	5,027	49,639
0,1	0	5,027	55,155

Таблица 2

Линейное искажение в плоскости ϕ

a_2	$\Delta\phi, ^\circ$	$\Delta\theta, ^\circ$	$\psi_{\max}, ^\circ$
0	0	0	0
0,01	1,002	0	7,2
0,02	2,005	0	14,4
0,03	3,008	0	21,6
0,04	3,008	0	28,8
0,05	4,011	0	36,0
0,06	5,013	0	43,2
0,07	6,016	1,005	50,4
0,08	7,019	1,005	57,6
0,09	8,022	1,005	64,8
0,1	9,025	1,005	72,0

Из представленных в таблицах сведений следует, что линейные искажения приводят к отклонению максимума ДН в сторону запаздывания фазы. Искажения в плоскости ϕ приводят к отклонению ДН как в плоскости ϕ , так и в плоскости θ .

В настоящее время для повышения точности определения радиолокационных параметров объектов применяют различные алгоритмы адаптации к геофизическим условиям, исходными данными для которых являются параметры среды распространения, получаемые с использованием дополнительных источников информации.

Предлагается для устранения ошибок, связанных с искажениями волнового фронта, модернизировать алгоритмы приема отраженного сигнала, применяемые в самофокусирующихся решетках [5] и адаптивных по отношению к турбулентным искажениям оптических системах. В этом случае процесс зондирования пространства осуществляется в два этапа. На первом этапе зондирующий импульс от РЛС отражается от объекта и поступает на кольцевую АР. В результате на элементах решетки формируется амплитудно-фазовое распределение, которое косвенно содержит информацию о среде распространения. После приема отраженного сигнала его фазовое распределение на элементах решетки фиксируется, затем формируется сопряженное фазовое распределение, которое используется при повторном излучении. Максимум излучения оказывается «направлен» с учетом текущего состояния трассы распространения на объект. При этом диаграмма направленности формируется с наименьшей шириной и обеспечивается максимально возможная плотность потока мощности в направлении лоцируемого источника. Фазовое распределение колебаний на апертуре кольцевой АР в режиме передачи в итоге примет вид

$$\begin{aligned} \dot{f}(\theta, \phi) = F_1(\theta, \phi) \sum_{i=1}^n \exp[-j\Delta\phi_i(\phi_0, \theta_0)] \times \\ \times \exp\{jkR[\cos(\phi - i\delta)\cos\theta - \cos(\phi_0 - i\delta)\cos\theta_0]\}. \end{aligned} \quad (6)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новизна рассматриваемого подхода основывается на переходе от линейной к кольцевой АР. Использование кольцевой АР обеспечит получение дополнительной радиолокационной информации по углу места лоцируемых объектов. Также новым является решение по адаптивной пространственно-временной обработке принимаемого сигнала, обеспечивающее оп-

тимизацию энергетического ресурса РЛС с позиции увеличения мощности излучения в направлении лоцируемого объекта.

В результате реализации рассмотренного подхода можно снизить энергетические затраты и повысить вероятность обнаружения объектов.

Список используемых источников

1. *Акимов В.Ф., Калинин Ю.К.* Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / ОАО «НПК «НИИДАР»; под ред. С.Ф. Боева. – М.: Техносфера, 2017. – 492 с.
2. *Саломатов Ю.П., Панько В.С., Сугак М.И.* Кольцевые излучатели и антенные решетки / под ред. Ю.П. Саломатова. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 120 с.
3. *R.C. Hansen.* Phased array antenna. – John Wiley & Sons, 2009. – 509 p.
4. *Невзоров В.И., Капылов Е.Л., Савочкин П.В.* Апертурные антенны: учеб. пособие / под общ. ред. В.И. Невзорова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 85 с.
5. *Невзоров В.И., Савочкин П.В., Бакурский К.В.* Антенные решетки: учеб. пособие / под общ. ред. В.И. Невзорова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 105 с.

Е.В. Благодыренко;
А.В. Назаров,
доктор техн. наук, доцент

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ЕГО СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПОРТРЕТА

В работе представлены результаты экспериментальных исследований комбинаторно-метрического алгоритма распознавания многомерных групповых точечных объектов в пространстве двухуровневых признаков спектрофотометрических портретов космических аппаратов. Априорная неопределенность относительно ракурса наблюдения и координатных шумов характеристик группового точечного представления кортежа кривых обуславливает наличие комбинаторных процедур (сочетаний и перестановок) при количественной оценке меры близости многомерных групповых точечных объектов, отображающих объект распознавания в пространстве признаков фотометрической системы ($U-B$), ($B-V$) и ($V-R$). На примере шаблонов состояний, сформированных по базе данных кривых блеска многоканального мониторингового телескопа, получены оценки показателей достоверности распознавания представленным алгоритмом.

Ключевые слова: космический аппарат, кривая блеска, спектрофотометрия, достоверность распознавания.

ВВЕДЕНИЕ

Регистрируемый блеск космического аппарата (КА), стабилизированного вращением, практически полностью определяется его формой (компоновкой), размерами и характером собственного вращения, который может значительно изменяться со временем, например, если КА прекращает функционировать при повреждении систем ориентации-стабилизации и др. Все изменения в конструктивно-функциональном состоянии КА проявляются в фотометрической реализации, под которой понимается совокупность измерений на выбранном участке траектории, полученная при сопровождении КА на одном витке [1, 2]. Одним из направлений исследований в части повышения информативности и достоверности определения состояний КА являются методы получения спектральных характеристик наблюдаемых объектов [3]. Выявление отличительных особенностей у каждого КА внутри рассматриваемой группы способствует эффективности их распознавания и во многом зависит от знания параметров и факторов, характеризующих объекты, подлежащие контролю. Наиболее часто используемыми группами признаков распознавания являются:

а) энергетические, характеризующие интенсивность излучения КА в рабочем спектральном диапазоне ОЭС, которые определяются значениями интегральных коэффициентов отражения материалов внешних покрытий в этом спектральном диапазоне и габаритами объекта при известных условиях его наблюдения;

б) спектральные, характеризующие спектральное распределение отраженного от КА солнечного излучения и зависящие от значений спектральных коэффициентов отражения материалов его внешних покрытий.

Группа спектральных признаков основана на использовании параметров сигналов, связанных со спектральным распределением интенсивности отраженного от КА солнечного излучения. Основные материалы покрытий, которые используются в настоящее время в конструкции КА, сильно отличаются друг от друга [4]. Имеющиеся отличия в спектральных коэффициентах отражения материалов внешних конструктивных элементов наблюдаемых объектов различных типов и соотношений между размерами этих элементов приводят к раз-

личию в спектрах отраженного от них солнечного излучения, поэтому они могут быть использованы для классификации фотометрических признаков и распознавания по ним типа наблюдаемого КА. Характер изменения спектральных характеристик для объектов разного типа индивидуален, и при этом внешний вид КА не отличается большим разнообразием. Обычно сам КА устанавливается на стандартную космическую платформу, которая оснащается необходимым оборудованием в соответствии с требованиями заказчика. В настоящее время в эксплуатации находится около десятка универсальных КП и их модификации. Тем самым их сходство или различие можно определить, лишь выявив конструктивные особенности наблюдаемых КА и определив усредненные спектральные характеристики каждого из них. Сопоставляя вычисленные показатели цвета характерных участков фазовой кривой блеска КА со спектральными характеристиками известных материалов покрытий, можно сделать предположение о наблюдаемом элементе конструкции объекта, предположив его целевое назначение.

СТРУКТУРА СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПОРТРЕТА

Фотометрическими признаками в трехмерном пространстве фотометрической системы ($U-B$), ($B-V$), ($V-R$), формирующими спектрофотометрический портрет, определены (рис. 1):

1) математическое ожидание m_x каждой реализации, при этом для контроля вычислений необходимо оценивать ошибку e_{mx} полученного значения математического ожидания:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad e_{mx} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где n – количество отсчетов реализации; σ – среднеквадратическое отклонение измеряемого параметра;

2) среднеквадратическое отклонение σ реализации, точнее выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО) с оценкой ошибки e_σ вычисленного значения СКО:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}, \quad e_\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2n}};$$

3) коэффициент вариации J , показывающий, какую долю или процент составляет среднеквадратическое отклонение от среднего значения (для установления степени выравненности совокупности по тому или иному признаку). Коэффициент вариации и его ошибка e_J вычисляются по формуле

$$J = \frac{\sigma}{m_x} 100\%, \quad e_J = J \sqrt{\frac{0,5 + 0,0001J^2}{n}};$$

4) средняя разность Джинни g характеризует разброс значений вариантов реализации друг относительно друга и не зависит от какого-либо центрального значения, например от среднего значения или медианы, вычисляется по формуле

$$g = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n |x_i - x_j|;$$

5) удельная энтропия вариационного ряда измеряемого параметра, или энтропия дискретного множества отсчетов реализации $H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k a_i \log_2 a_i$, где a_i – элемент массива, вариант, разнесенный по классовым интервалам; k – число классовых интервалов (не более 15), которое определяется по правилу Стержесса, $k = 3,32 \lg n + 1 = 1,44 \ln n + 1$ (n – число отсчетов реализации). Интервальный вариационный ряд группируется по каждому измеряемому параметру. Под группировкой (классификацией, разнесением вариантов по классам) понима-

ется разбиение интервала, содержащего все n наблюдавшихся значений отсчетов реализации на k интервалов. Для случая количественной шкалы реализации число наблюдений v_j , $j=1, \dots, k$, попавших в j -й класс, означает количество отсчетов реализации, удовлетворяющих неравенству $t_j - \frac{t_j}{2} < x < t_j + \frac{t_j}{2}$, $j = \overline{1, k}$, где t_j , $j=1, 2, 3, \dots, k$ – середины классовых интервалов; d_j – величина интервала группировки;

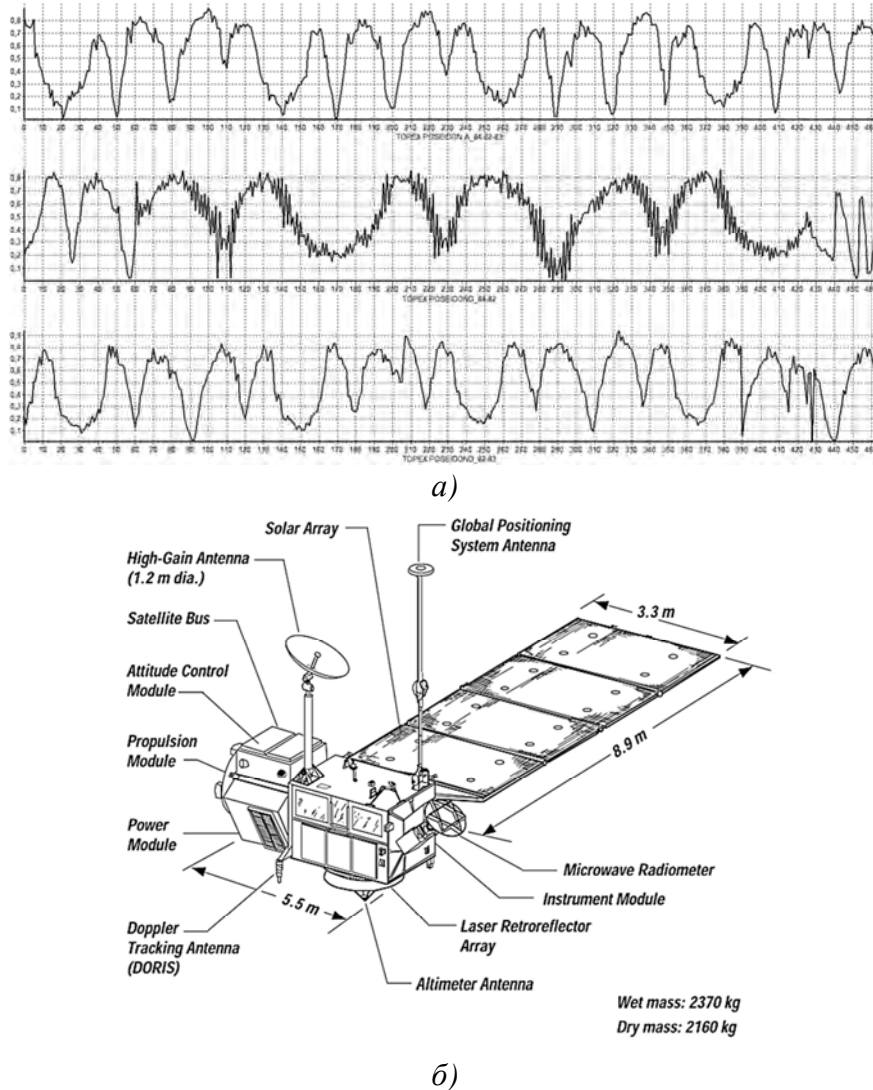


Рис 1. Пример регистрации в различных диапазонах (различных во времени) кривых блеска (а), КА TOPEX POSEIDON (б)

б) избыточность вариационного ряда реализации вычисляется как

$$I = \frac{1}{n} \left(1 - \sum_{j=1}^k a_j \log_2 a_j / \sum_{i=1}^n x_i \log_2 x_i \right),$$

где k – число классовых интервалов, определенных по правилу Стержесса;

n – число отсчетов измеряемого параметра.

Сформированный индивидуальный статистический портрет (ИСП) КА по данным статистических характеристик спектрофотометрических реализаций является основой новой выборки – выборки ИСП однотипных компоновок, покрытий, вида стабилизации и фазовых углов КА. С целью синтеза выборки использовалась база данных многоканального мониторингового телескопа [5].

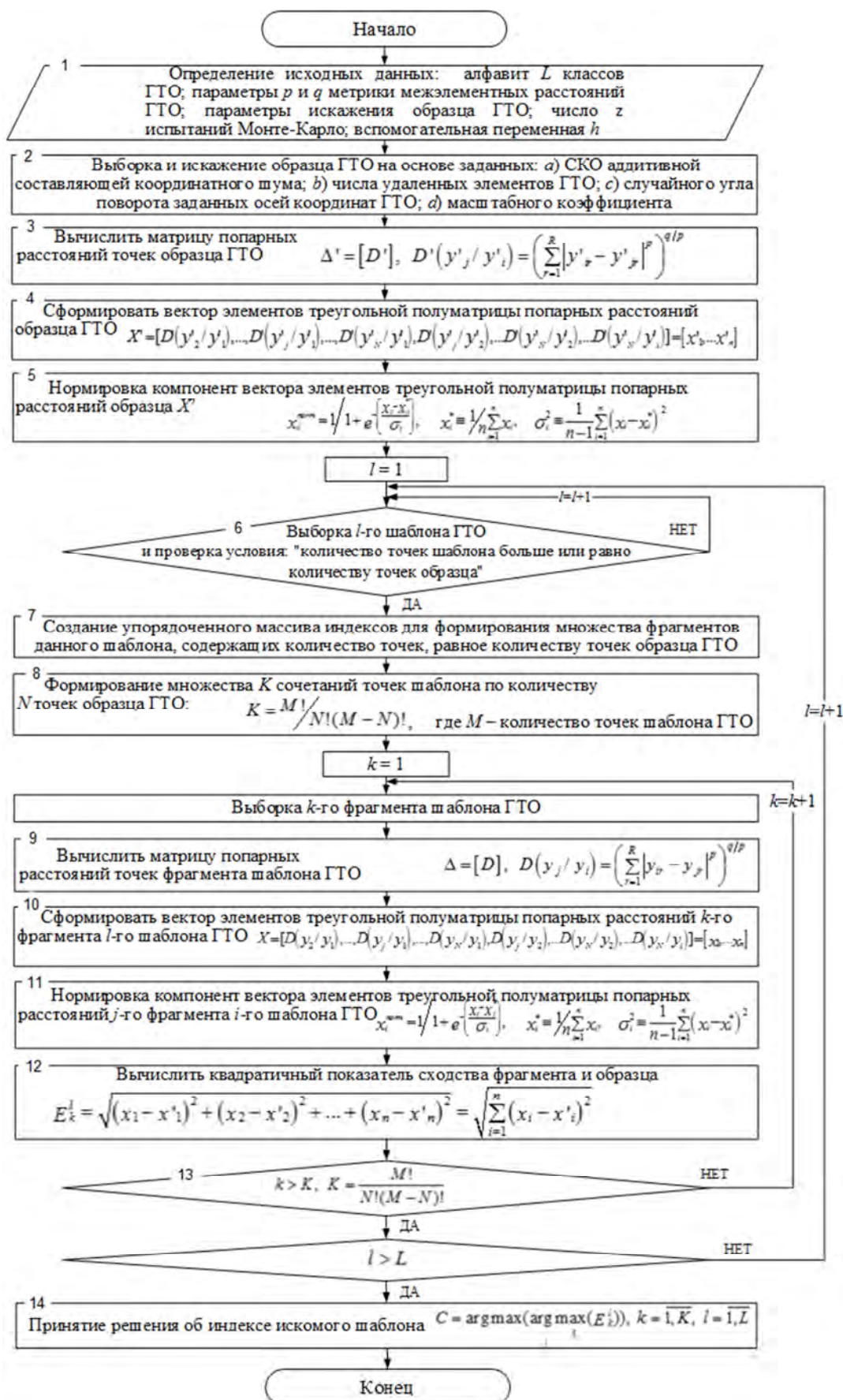


Рис 2. Алгоритм распознавания состояния КА по ГТО его спектрофотометрического портрета

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Принимая гипотезу об информативности и постоянстве зависимости относительных изменений различных кривых блеска от функционально-конструктивных характеристик космических объектов в различных ракурсах (спектральных диапазонах) с учетом фазовых углов, типа стабилизации и типа отражающей поверхности, каждая из m кривых представляется в виде точки в пространстве ее n характеристик и последующего распознавания типовых компоновок конструкций (или технического состояния) космических объектов посредством идентификации групповых точечных объектов ГТО. Алгоритм распознавания представлен на рис. 2 [6].

При распознавании временных процессов подразумевается, что один и тот-же процесс, согласно классическому уравнению наблюдений отображается m кривыми, и его представление в виде ГТО осуществляется по каждой из m кривых в пространстве ее n однотипных характеристик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА

На рис. 3 представлены результаты полунатурных экспериментов по распознаванию организованных образцов ГТО, представляющих спектрофотометрические портреты типовых состояний КА из базы данных многоканального мониторингового телескопа (ММТ) [5]. Достоверность распознавания статистических характеристик кривых блеска в различных спектральных диапазонах (точек) ГТО – от 10 до 100%. Вероятность «недостовверных измерений» – 0%. Каждая точка графиков – результат статистического усреднения по 100 итерациям распознавания.

Характер зависимостей при неполных входных образах (50 и 65% удаленных элементов) свидетельствует о том, что момент пересечения априорных показателей указывает на необходимость смены стратегии принятия решения об отнесении ГТО к тому или иному классу.

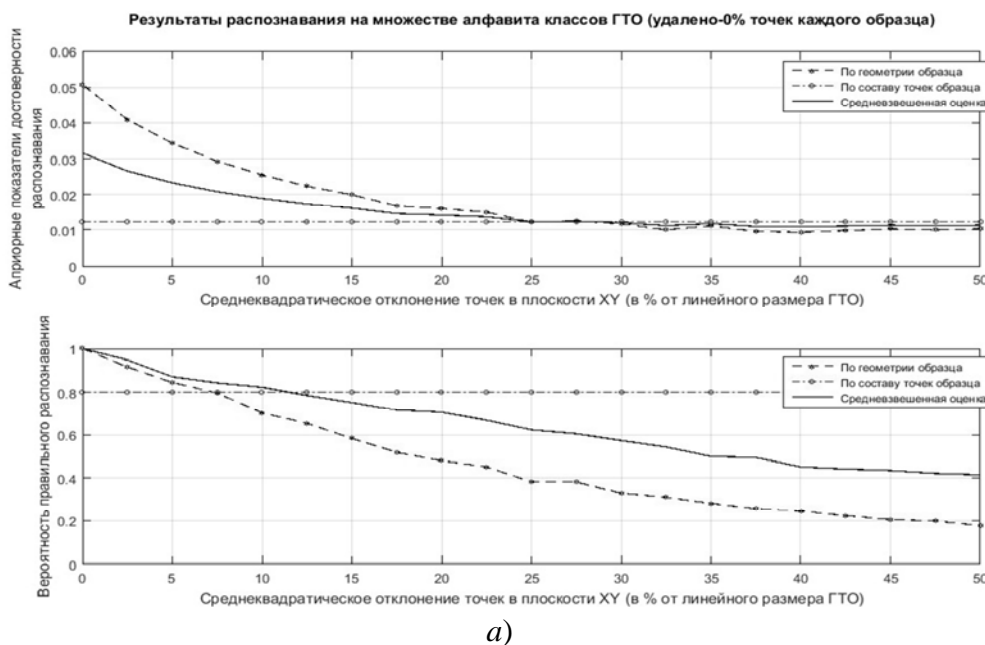
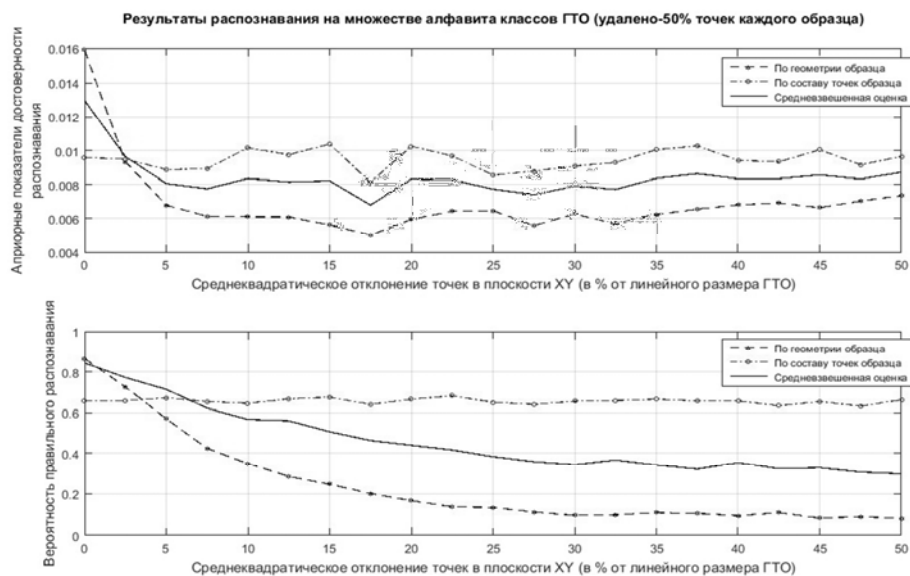


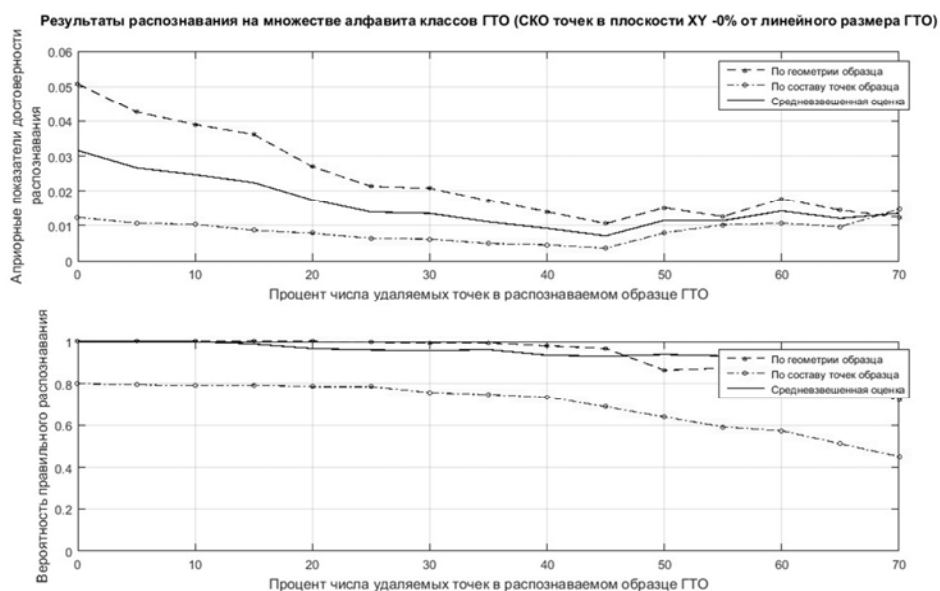
Рис 3. Априорные и апостериорные показатели распознавания в зависимости от среднеквадратического отклонения характеристик кривых блеска при различных процентных соотношениях обнаруженных и необнаруженных характеристик ГТО: а – 0%; б – 50% (начало)



б)

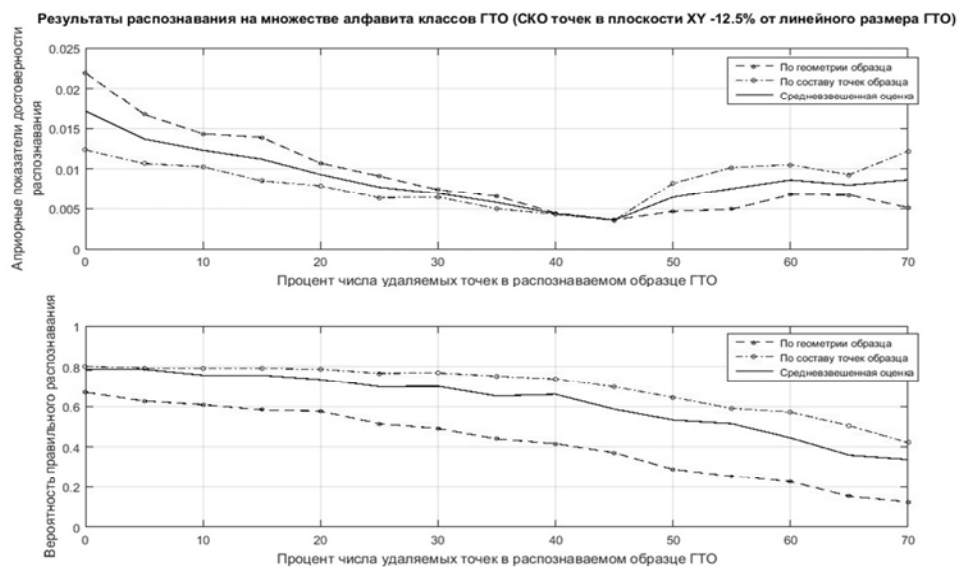
Рис. 3. Априорные и апостериорные показатели распознавания в зависимости от среднеквадратического отклонения характеристик кривых блеска при различных процентных соотношениях обнаруженных и необнаруженных характеристик ГТО: а – 0%; б – 50% (окончание)

Зависимости (рис. 4) иллюстрируют индикацию априорным показателем достоверности E_i^h , $i = 1, m'_h$, $h = 1, L_{k-1}$, выбора типа процедуры принятия решения о принадлежности к классу, например при СКО точек более 12% от линейного размера распознаваемого ГТО, принимать решение о принадлежности целесообразно по процедуре на основе состава признаков спектрофотометрического портрета.



а)

Рис. 4. Априорные и апостериорные показатели распознавания иерархически организованных образцов в зависимости от процентных соотношений обнаруженных и необнаруженных точек ГТО при различных СКО: а – 0%; б – 12,5% (начало)



б)

Рис. 4. Априорные и апостериорные показатели распознавания иерархически организованных образцов в зависимости от процентных соотношений обнаруженных и необнаруженных точек ГТО при различных СКО:
а – 0%; б – 12,5% (окончание)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имитационное моделирование и результаты полунатурных экспериментов с данными ММТ свидетельствуют о том, что кривые блеска считаются весьма информативным источником некоординатной информации для решения задач распознавания (подтверждения) типовых функционально-конструктивных состояний КА. Достоинством использованного алгоритма является возможность реализации многомерных масштабируемых представлений спектрофотометрических портретов, представимых групповыми точечными объектами, при этом используется пространство той минимальной мерности, которая позволяет достоверно классифицировать зашумленные и искаженные (поворот, смещение, прореживание) образцы ГТО. Повышение достоверности распознавания, обусловленное иерархией системы признаков образца, обеспечивается включением в комбинаторное множество индексов априорных показателей не только тех, которые вычислены на $(k-1)$ -м уровне иерархии и имеют максимальные значения, но и L , следующих по убыванию. Величина L ограничивается вычислительными ресурсами вычислителя и максимальным временем решения задачи распознавания. В свою очередь, сопоставление восстановленных по шаблонам показателей и характеристик спектрофотометрического портрета со спектральными характеристиками известных материалов покрытий позволяет формулировать предположения о характеристиках наблюдаемых элементов конструкции, покрытий, предположив их целевое назначение и состояние.

Список используемых источников

1. Логунов С.В., Катюха Р.В., Чистяков С.В. Алгоритм формирования частного фотометрического каталога опорных звезд в системе современного приемника излучения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 639. – С. 68–74.

2. Применение многоспектральных фотометрических данных в задаче распознавания космических объектов / Г.Н. Колесниченко, А.В. Миронов, А.А. Васютин и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010 – Т.8, № 5, – С. 86–91.
3. *Рыхлова Л.В.* Засоренность околоземного пространства объектами техногенного происхождения // Околоземная астрономия. – 2003. – Т. 2. – С. 11–20.
4. *Колесник Д.Ю., Логунов С.В., Евенко А.В.* Способ обработки и анализа результатов некоординатных измерений для распознавания вращающихся геостационарных спутников // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2018. – Вып. 3. – С. 37–42.
5. База данных фотометрии искусственных спутников Земли Многоканальным мониторинговым телескопом. – URL:<http://astroguard.ru/satellites> (дата обращения: 17.04.2019).
6. Алгоритм классификации и восстановления искаженных n -мерных групповых точечных объектов на основе комбинаторного поиска фрагментов / А.Ю. Каплин, А.А. Коротин, А.В. Назаров и др. // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 6(49). – С. 167–189.

Е.В. Благодыренко;
А.В. Назаров,
доктор техн. наук, доцент

КОМБИНАТОРНО-МЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ГРУППОВЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИЕРАРХИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИЗНАКОВ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ РЕАЛИЗАЦИЙ

В работе представлен комбинаторно-метрический алгоритм распознавания объектов, имеющих пространственно-распределенную иерархическую организацию системы признаков. Априорная неопределенность относительно ракурса представления и координатных шумов элементов объекта наблюдения обуславливает наличие комбинаторных процедур (сочетаний и перестановок) при количественной оценке меры близости многомерных групповых точечных объектов, представляющих объект распознавания в анизотропном пространстве его признаков. Для повышения достоверности распознавания предложено включать в перебор результаты распознавания на нижних уровнях иерархии, характеризующихся более низкими априорными показателями достоверности распознавания первичных признаков. Приведены экспериментальные зависимости априорных и апостериорных показателей достоверности распознавания при различных условиях измерений и состояний объектов наблюдений.

Ключевые слова: многоуровневый групповой точечный объект, распознавание образов, иерархия признаков, достоверность распознавания.

ВВЕДЕНИЕ

Современные высокотехнологичные системы, такие как системы технического зрения, радиовидения, технической диагностики предъявляют к алгоритмам распознавания требования оперативного принятия решений в неоднородном, высокоразмерном и иерархическом пространстве признаков. В процессе получения и обработки оптической или радиолокационной информации решаются следующие основные задачи: обнаружение целей, измерение параметров их движения, обнаружение и сопровождение траекторий целей, объединение информации от различных источников. Последняя обуславливает необходимость достоверного распознавания протяженных во времени и/или пространстве многоуровневых объектов/процессов, включая и их представления групповыми точечными объектами (ГТО).

МНОГОУРОВНЕВЫЕ ГРУППОВЫЕ ТОЧЕЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

В многоуровневых системах распознавания словарь признаков определен на множестве алфавитов классов локальных распознающих устройств, расположенных на нижних уровнях иерархии. Например, при распознавании космических объектов используют различные признаки, выделяемые из интегральных, многоспектральных фотометрических и спектрофотометрических измерений (кривые блеска) [1, 4]. Такими признаками могут являться значения одноименных параметров фотометрических реализаций, полученных при многопунктных синхронных базисных наблюдениях (рис. 1).

Принимая гипотезу об информативности и постоянстве зависимости относительных изменений различных кривых блеска от функционально-конструктивных характеристик космических объектов в различных ракурсах (спектральных диапазонах), с учетом фазовых углов, типа стабилизации и типа отражающей поверхности, каждая из m кривых представляется в виде точки в пространстве ее n характеристик и последующего распознавания типовых ком-

поновок конструкций (или технического состояния) космических объектов посредством идентификации ГТО.

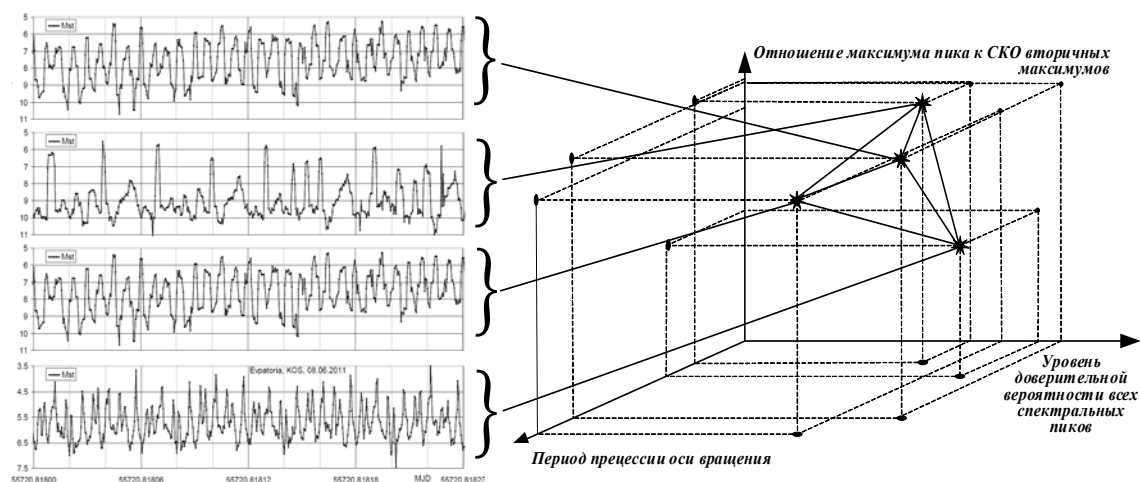
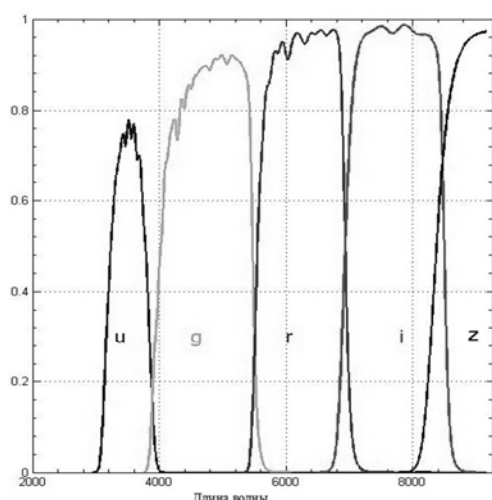
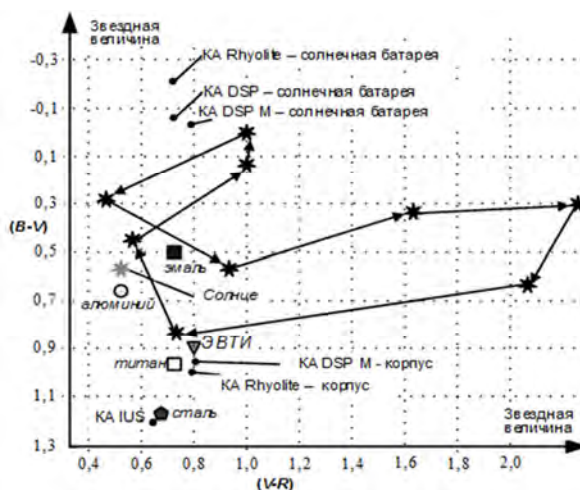


Рис 1. Распознаваемый образец, включающий четыре синхронных фрагмента кривой блеска (КА NanoSail-D от 08.06.2011, шкала блеска в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км), преобразованных в 4-точечный ГТО в пространстве трех характеристик (пример)

Кроме точечного представления интегральных параметров временных реализаций возможно использование многоточечного представления однопунктных многоспектральных/спектрофотометрических наблюдений и получение спектрально зависимых характеристик оптических сигналов в n -цветных диаграммах в различных фотометрических системах ($U-B$) и ($B-V$), ... и др. (рис. 2,а). Например, анализ двухцветной диаграммы ($B-V$) и ($V-R$) для геостационарных объектов (рис. 2,б) показывает, что различные типы объектов группируются на ней по показателям цвета [2]. При этом в фотометрических системах, содержащих большее число спектральных полос, чем BVR или UBV , различия между показателями цвета позволяют более уверенно различать КА по компоновкам конструкции и покрытиям.



а)



б)

Рис 2. Пример широкополосной пятицветной фотометрической системы UGRIZ для каталога SDSS – как пространственного базиса ГТО (а); ГТО (вершины графа), образованный измерениями через равные промежутки времени показателей цвета КА в двухмерном фазовом пространстве фотометрической системы $UBVR$ за период 1,35 с (б) [1]

Использование n поддиапазонов в полосе пропускания оптико-электронной системы обуславливает n -мерность вложения ГТО, а количество и взаимное расположение точек ГТО, зафиксированных через равные промежутки времени, определяют мощность признаков для распознавания наблюдаемой ситуации.

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ГРУППОВЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Пусть на k -м уровне иерархии каждый l -й элемент ρ_l алфавита классов $\{\rho_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ распознаваемых многоуровневых объектов мощностью L_k представлен типовым шаблоном ГТО, содержащим m_l , $l = \overline{1, L_k}$ элементов (точек) $\{y_1^l, y_2^l, \dots, y_i^l, \dots, y_{m_l}^l\}$ в n_k -мерном пространстве признаков с введенной метрикой, причем одна j -я, $j = \overline{1, n_k}$ или q_k ($q_k \leq n_k$) осей системы координат ГТО представлены числовой шкалой или шкалой линейного порядка. Дополнительно каждый представитель алфавита классов $\{\rho_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ распознаваемых многоуровневых объектов описывается вектором s_l , $l = \overline{1, L_k}$, компоненты которого однозначно определены на множестве словаря некоординатных признаков s , так что сформирована матрица $[s_{lv}]$ типа «объект – признак»:

$$[s_{lv}], \quad l = \overline{1, L_k}, \quad v = \overline{1, V},$$

где L_k – число классов на k -м уровне иерархии;

V – количество некоординатных признаков, одинаковое для каждого класса.

Описывая уровни «вниз», предположим, что значение по одной j -й, $j = \overline{1, n}$ или q_k ($q_k \leq n_k$) осям координат каждого i -го элемента (точки) y_i^l , $i = \overline{1, m_l}$, $l = \overline{1, L_{k-1}}$ l -го ГТО есть результат распознавания, определенный на одном (в общем случае n_{k-1}) множестве $\{\varsigma_h\}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$ алфавита классов нижнего $(k-1)$ -го уровня иерархии, где L_{k-1} – число классов, характеризующих j -ю координату i -й точки l -го ГТО. Тогда каждый h -й элемент алфавита классов $\{\varsigma_h\}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$, характеризующий j -ю координату i -й точки l -го ГТО, описан следующим образом:

1) h -м ГТО объекта ς_h из алфавита классов $\{\varsigma_h\}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$, где каждый класс ГТО определен типовым шаблоном, содержащим m_h , $h = \overline{1, L_{k-1}}$ элементов $\{y_1^h, y_2^h, \dots, y_i^h, \dots, y_{m_h}^h\}$ в n_{k-1} -мерном евклидовом пространстве признаков;

2) вектором U_h , $h = \overline{1, L_{k-1}}$, компоненты которого определены на множестве словаря некоординатных признаков, так что сформирована матрица $[u_{hw}]$ вида «объект – признак»:

$$[u_{hw}], \quad h = \overline{1, L_{k-1}}, \quad w = \overline{1, W},$$

где L_{k-1} – число классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии;

W – количество некоординатных признаков на $(k-1)$ -м уровне иерархии, одинаковое для каждого h -го класса распознаваемых объектов.

Пусть в результате поиска (сканирования) во времени и/или пространстве на вход алгоритма поступает описание образца в пространстве признаков $(k-1)$ -го уровня иерархии, включающее:

1) q_k неупорядоченных подмножеств (точек) $\{y_1^h, y_2^h, \dots, y_i^h, \dots, y_{m_h}^h\}$ в n_{k-l} -мерном евклидовом пространстве признаков по каждой из q_k ($q_k \leq n_k$) осей системы координат ГТО k -го (верхнего) уровня иерархии, где m_h – число точек образца, в общем случае отличное от количества точек любого из шаблонов m_h , $h = \overline{1, L_{k-1}}$;

2) q_k векторов U_h^i , $h = \overline{1, L_{k-1}}$ абсолютных упорядоченных значений некоординатных признаков в классическом представлении системы распознавания $U_h^i = [u_1, u_2, \dots, u_w, \dots, u_{w'}]^T$.

Примем, что предъявляемый образец является неизвестным фрагментом l -го элемента p_l алфавита классов $\{p_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$, не содержит дополнительных элементов (ложных отметок в составе ГТО), и образцу присущи все виды искажений, описанные выше. Требуется на основе описания p_l алфавита классов $\{p_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ распознаваемых многоуровневых объектов определить класс принадлежности образца в пространстве вычисленных вторичных признаков k -го уровня иерархии. В агрегированном представлении алгоритм декомпозирован на 10 этапов.

Этап 1. По каждому из q_k объектов, представленных ГТО $(k-1)$ -го уровня иерархии, включающих неупорядоченные подмножества точек $\{y_1^h, y_2^h, \dots, y_i^h, \dots, y_{m_h}^h\}$, распознается значение одной или q_k ($q_k \leq n_k$) координат каждого i -го элемента (точки) y_i , $i = \overline{1, m}$, представляющего распознаваемый объект (ГТО) на k -м уровне иерархии:

$$C_{k-1} = \underset{h}{\operatorname{argmin}}(E_{k-1}^h), \quad h = \overline{1, L_{k-1}},$$

где L_{k-1} – число классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии;

E^h – априорный показатель достоверности метрического распознавания на $(k-1)$ -м уровне иерархии, минимизируемый перебором на 8 этапе алгоритма по множеству L_{k-1} классов.

Показатель E^h вычисляется как

$$E_i^h = \frac{1/d_i}{\sum_{j=1}^{m_h} 1/d_j}, \quad d(y_l^h, y_p^h) = \sum_{z=1}^J w_z |y_{lz}^h - y_{pz}^h|, \quad i = \overline{1, n_k}, \quad j = \overline{1, m_h},$$

где w_z – весовой коэффициент z -го признака элементов y_l^h и y_p^h ;

E_i^h – переменная, функционально подобная априорной вероятности правильного распознавания по расстоянию Хэмминга, так как $\sum_{i=1}^{m_h} E_i = 1$ [3].

Этап 2. Линейная нормировка компонентов вектора координат каждого i -го элемента (точки) y_i , $i = \overline{1, m}$, ГТО путем приведения распознанных значений к единичному масштабу

$[0,1]$: $y_i^{\text{norm}} = \frac{y_i - y_{i,\min}}{y_{i,\max} - y_{i,\min}}(b - a) + a$, в единичный отрезок: $y_i^{\text{norm}} \in [0,1]$, где a и b – границы

нормированного диапазона (в нашем случае $a = 0$, $b = 1$), а $y_{i,\min}$ и $y_{i,\max}$ – минимальные и максимальные значения по шкале q_k , ($q_k \leq n_k$) оси координат, представляющих ГТО на k -м уровне иерархии.

Этап 3. Выполняя q_k процедур распознавания, нормировки (п. 1, 2), формируются все элементы ГТО $\{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m\}$, представляющие образец на k -м уровне иерархии в n_k -мерном пространстве признаков с мерой достоверности распознавания каждой из m точек по каждой из n_k осей координат в пространстве признаков ГТО в виде вектора $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_m\}$, $\xi_i = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} E_{ij}^h$, $i = 1, m, j = 1, n_k$, т.е. достоверность распознавания i -й точки есть среднеарифметическое вероятности правильного определения ее n_k координат. Вектор вычисленных априорных показателей достоверности распознавания классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии Ξ правомерно рассмотреть как вектор весов при вычислении метрического сходства ГТО с шаблонами на k -м уровне иерархии.

Этап 4. Фиксируется тип интегрального геометрического инварианта n -угольника, построенного на n точках образца ГТО с целью поиска на множестве алфавита классов методом перебора инварианта, идентичного этому n -угольнику по геометрии. В численных экспериментах по распознаванию использовались такие инварианты, как матрица попарных расстояний между точками образца ГТО и матрица углов на плоскости, проведенной через три точки образца ГТО. Число признаков определяется матрицей попарных расстояний $n = \frac{m!}{2!(m-2)!}$, с использованием в качестве признаков углы и расстояния от произвольной заданной начальной точки для образца ГТО на плоскости ($n_k = 2$) $n = 2m - 3$, в пространстве ($n_k = 3$):

$$n = (m-1) + \frac{(m-1)!}{3!((m-1)-3)!},$$

где m – число точек образца ГТО. Для произвольных замкнутых ограниченных множеств J справедливо изопараметрическое неравенство вида $F(J) \geq n_k \sqrt[n_k]{W_{n_k}} V(J)^{(n_k-1)/n_k}$, где $F(J)$ – поверхность множества J ; $V(J)$ – объем множества J ; W_{n_k} – объем n_k -мерного единичного шара, так как шар имеет минимальную поверхность из всех тел равного объема. Поскольку минимум среднего расстояния между точками множества при его линейных преобразованиях с сохранением объема достигается для минимальной поверхности множества, т.е. для гиперсферы, то, приняв в качестве разделяющих классы поверхностей гиперсферы, целесообразно решать задачу распознавания путем вычислений матрицы $[D_{ij}]$ попарных расстояний между точками образца ГТО в евклидовой метрике:

$$[D_{ij}], \quad D(y_j / y_i) = \left(\frac{1}{\xi_i} \sum_{r=1}^{n_k} |y_{ir} - y_{jr}|^q \right)^{\frac{1}{q}},$$

где ξ_i – достоверность распознавания i -й точки образца;

n_k – размерность пространства признаков ГТО на k -м уровне иерархии, в алгоритме варьировалось значение q , от 2 до 6, когда расстояние приближается к наибольшему отклонению по какой-либо из координат.

Этап 5. На основе $[D_{ij}]$ формируется вектор $[X]$ элементов треугольной полуматрицы попарных расстояний образца ГТО:

$$X = [D(y_2 / y_1), \dots, D(y_j / y_1), \dots, D(y_m / y_1), D(y_j / y_2), \dots, D(y_m / y_2), \dots, D(y_m / y_i), \dots, D(y_m / y_{m-1})] = [x_1, \dots, x_n],$$

где n – число попарных расстояний между точками образца ГТО, $n = \frac{m!}{2!(m-2)!}$;

m – число точек образца ГТО.

Вектор $[X]$ является вектором признаков образца ГТО, по которому вычисляются метрические показатели сходства с каждым из $\overline{L_k}$ векторов $X_l, l = \overline{1, L_k}$ шаблонов алфавита классов. Так как число точек ГТО всегда меньше матриц интегрального геометрического инварианта n -угольника, построенного на n точках ГТО, то комбинаторные процедуры (перестановки и/или сочетания) проводятся над индексами точек ГТО шаблонов алфавита классов.

Этап 6. Создание двумерного массива индексов для формирования r фрагментов каждого из $\overline{L_k}$ векторов попарных расстояний $X_l, l = \overline{1, L_k}$, шаблонов алфавита классов, вычисленных по количеству точек, равному количеству точек образца ГТО. Каждый столбец массива индексов содержит $P_{m_l} = m_l!$ или $C_{m_l}^m = \frac{m_l!}{((m_l - m)!m!)}$ строк, образованных, соответственно, в результате перестановок компонент векторов $X_l, l = \overline{1, L_k}$ или их сочетаний по числу m компонент вектора попарных расстояний между точками образца ГТО. Выбор использования перестановок или сочетаний из m_l по m определяется количеством точек распознаваемого образца ГТО (например, при $m_l \geq 15$ число перестановок $C_{m_l}^m \geq 10^{13}$). Каждая строка массива индексов образована вектором попарных расстояний $[X_l^r]$ для одной r -й реализации сочетания (перестановки) порядка перечисления точек l -го шаблона $X_l, l = \overline{1, L_k}$ шаблонов алфавита классов.

Этап 7. Вычислить $Z = \frac{\sum_{l=1}^{L_k} n_l!}{((n_l - n)!n!)}$ или $Z = \sum_{l=1}^{L_k} n_l, l = \overline{1, L_k}$ показателей сходства E_k^l , где

L_k – количество классов (шаблонов), к которому может быть отнесен образец; n_l – число попарных расстояний между точками l -го шаблона ГТО на k -м уровне иерархии, т.е. длина вектора $X_l, l = \overline{1, L_k}$.

Этап 8. Принятие решения C об индексе искомого класса принадлежности, соответствующего искаженному образцу по критерию минимума показателя, имеет вид

$$E_k^l = \sqrt{(x_{k1} - x_{k1}^l)^2 + (x_{k2} - x_{k2}^l)^2 + \dots + (x_{kn} - x_{kn}^l)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ki} - x_{ki}^l)^2},$$

$$C = \arg \min_r (\arg \min_l (E_r^l)), r = \overline{1, R}, l = \overline{1, L_k},$$

где R – количество комбинаций точек l -го шаблона ГТО соразмерного распознаваемому образцу;

L_k – количество классов (шаблонов) на k -м уровне представления объекта.

Этап 9. С целью повышения апостериорной вероятности правильного распознавания образца путем использования информации, содержащейся в комбинациях показателей E^h , вычисленных на этапе 1 алгоритма, осуществляются следующие операции:

9.1. Ранжирование вычисленных индексов C по убыванию показателей $E_i^h, i = \overline{1, m_h}, h = \overline{1, L_{k-1}}$, вычисленных в результате распознавания элементов ГТО $\{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m\}$, $C_{k-1} = \arg \min_h (E_{k-1}^h), h = \overline{1, L_{k-1}}$, где L_{k-1} – число классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии.

9.2. Начиная с результатов, следующих после $\underset{h}{\operatorname{argmin}}(E_{k-1}^h), h = \overline{1, L_{k-1}}$ по убыванию, выполнение шагов 1–8 с принятием решения об индексе искомого класса принадлежности образца по всем $h = \overline{1, L_{k-1}}$.

Этап 10. Комплексирование результатов выполнения всех трех процедур: многократного (или многоакурсного) распознавания на уровне решений совместно с результатами многоуровневой процедуры распознавания по q_k векторам $U'_h, h = \overline{1, L_{k-1}}$ упорядоченных значений некоординатных признаков $U'_h = [u_1, u_2, \dots, u_w, \dots, u_w]^T$ в классическом представлении системы

распознавания и вычисление показателя достоверности распознавания вида $\mu_r = r \frac{(E_k^l)^2}{\sigma_n^2} = r\mu_1$,

где r – количество реализаций 1–9 этапов алгоритма распознавания (или количество ракурсов, с которых одновременно и независимо друг от друга регистрируется и распознается образец при выполнении 1–9 этапов), отношение показателя достоверности распознавания по классу, принятому в качестве распознанного к среднеквадратическому отклонению σ_n^2 показателей достоверности, вычисленных по всем остальным элементам алфавита классов

$\{\rho_l\}, l = \overline{1, L_k}$, при однократном измерении, $\mu_1 = \frac{(E_k^l)^2}{\sigma_n^2}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

На рис. 3 представлены результаты экспериментов по распознаванию иерархически организованных образцов (алфавит классов – 50 шаблонов), представленных на $(k-1)$ -м уровне иерархии пространственно-локализованными бинарными признаками, на k -м уровне, собственно, ГТО. Достоверность распознавания элементов (точек) ГТО на $(k-1)$ -м уровне иерархии – 100%.

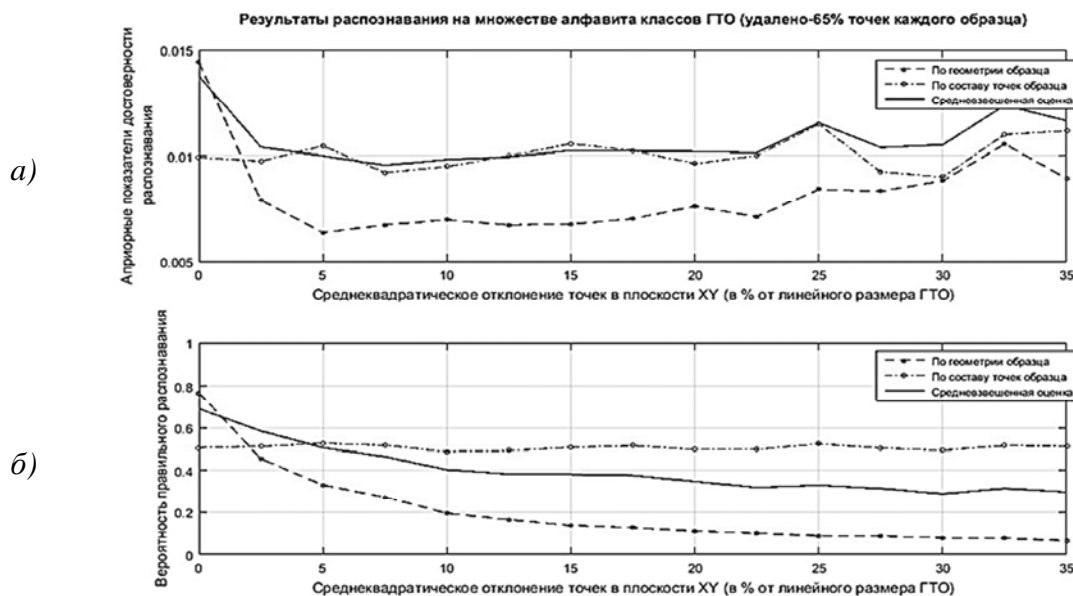


Рис 3. Показатели распознавания иерархически организованных образцов в зависимости от среднеквадратического отклонения точек при 65% необнаруженных точек ГТО:
а – априорные, б – апостериорные

Вероятность «недостовверных измерений» бинарных признаков целей (точек) – 0%. Каждая точка графиков – результат статистического усреднения по 100 итерациям распознавания.

При неполных входных образах (50 и 65% удаленных элементов) момент пересечения априорных показателей E_i^h , $i = 1, m'_h$, $h = 1, L_{k-1}$, свидетельствует о необходимости смены стратегии принятия решения об отнесении к тому или иному классу. При 65% удаленных элементах ГТО: до 1% СКО классификация образца должна осуществляться по результатам распознавания ГТО образца, с 1 до 4% СКО по средневзвешенному показателю и с СКО 5% по результатам процедуры распознавания по составу целей.

Связь априорных и апостериорных показателей при искажениях бинарных признаков целей иллюстрирует рис. 4, где при СКО целей 0% от линейного размера ГТО достоверность распознавания геометрической процедурой снижается только за счет изменения межточечных расстояний при неправильной классификации целей. В случае слабо зашумленных образов, даже при условии их неполноты, практически всегда достоверность распознавания по геометрии ГТО выше достоверности распознавания по составу элементов, что объяснимо с точки зрения количества информации двух представлений одного и того же распознаваемого образца. Потенциальная мощность алфавита классов взаимного расположения m точек превышает мощность алфавита классов их перестановок. При этом высокая достоверность распознавания по изображению обуславливает экспоненциальный рост требуемых вычислений в зависимости от количества точек.

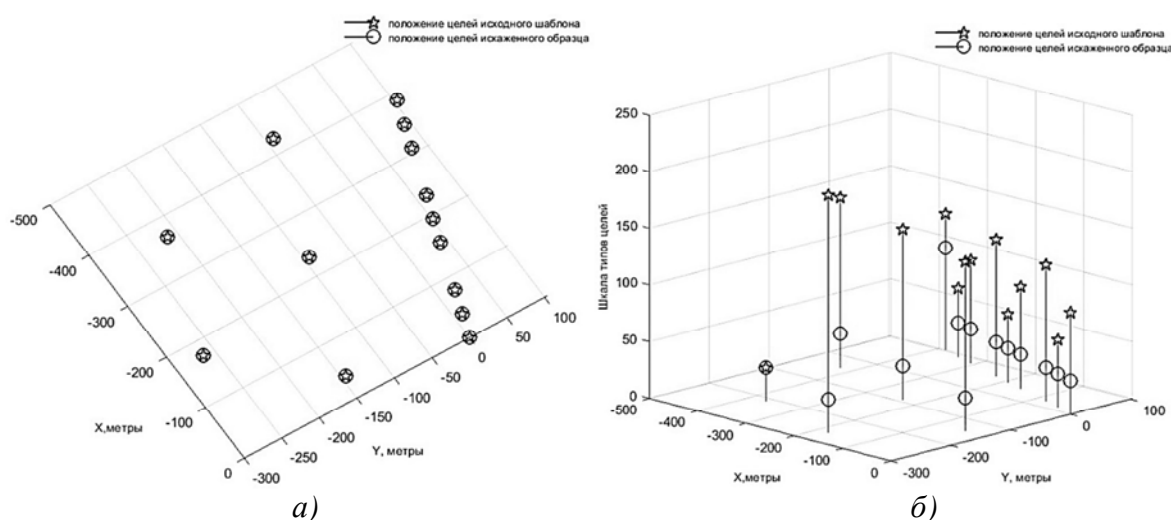


Рис 4. Результаты распознавания образца ГТО с различным процентным соотношением обнаруженных и не обнаруженных точек ГТО: 93% неправильно классифицированных типов целей (а); 0% СКО в плоскости ХУ (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемому алгоритму распознавания присущи две особенности:

1) наличие двух различных по физической природе классов признаков: признаков формы в относительной системе координат ГТО, представляющего образец, и упорядоченного набора абсолютных признаков в классическом представлении системы распознавания;

2) принятие решения о принадлежности к классу по априорным показателям (состав целей и геометрия целей) обеспечивает устойчивость алгоритма к неафинным искажениям геометрии и неполноты элементов образца.

Модификация шагов алгоритма 1, 7, 9 в части ранжирования вычисленных индексов C по убыванию показателей E_i^h , $i = \overline{1, m'_h}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$, вычисленных в результате распознавания элементов ГТО обеспечивает включение в комбинаторное множество индексов показателей E_{k-1}^h , $h = \overline{1, L_{k-1}}$, не только тех, которые имеют минимальные значения, но и L , следующих по убыванию. Тем самым повышается на 10–15% достоверность распознавания в зависимости от структуры алфавита классов и однородности структурных шаблонов кривых. Алгоритм может быть использован в оптико-электронных системах технического зрения, радиовидения и технической диагностики в условиях значительных погрешностей и неполноты результатов измерений и неафинных искажений образов объектов наблюдений в многоуровневых пространствах признаков, в которых решаются близкие задачи распознавания.

Список используемых источников

1. Применение многоспектральных фотометрических данных в задаче распознавания космических объектов / Г.Н. Колесниченко, А.В. Миронов, А.А. Васютин и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010 – Т.8, № 5. – С. 86–91.
2. Диденко А.В., Рспаев Ф.К. Многоцветные электрофотометрические наблюдения геостационарного спутника // Астрономический циркуляр. – 1984 – № 1333. – С. 6–9.
3. Биргер И. А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
4. Фурман Я.А. Точечные поля и групповые объекты. – М.: Физматлит, 2015. – 440 с.

С. О. Бурлаков,
доктор техн. наук
ВАС им. С.М. Будённого, г. Санкт-Петербург;
А. П. Таранущенко
ВАС им. С.М. Будённого, г. Санкт-Петербург;
А.Г. Шадрин,
кандидат техн. наук

ОПТИМИЗАЦИЯ СПРАВЕДЛИВОЙ ДИСЦИПЛИНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ IP-ПАКЕТОВ В МАРШРУТИЗАТОРЕ

Рассматривается справедливая дисциплина обслуживания IP-пакетов в маршрутизаторе. В предположении пуассоновского потока их поступления предложена математическая модель обслуживания. С учетом ограничения на производительность канала связи формализована задача поиска оптимальной пропорции выбираемых IP-пакетов из приоритетных очередей. Приведен пример решения.

Ключевые слова: качество телекоммуникационной услуги, справедливая дисциплина обслуживания, разнородный трафик, приоритетная очередь, IP-пакет.

ВВЕДЕНИЕ

Качество телекоммуникационных услуг при использовании протокола TCP/IP во многом определяется степенью выполнения требований к доставке IP-пакетов. Разноприоритетные пакеты различных служб (передача файлов, запросов, транзакций, видео и т.д.) передаются по транспортной сети связи совместно. [1, 2]. Для повышения качества переноса разнородных пакетов в маршрутизаторах сети имеется возможность использовать одну из нескольких дисциплин их обслуживания, такой дисциплиной является CBWFQ (взвешенное справедливое обслуживание на основе классов). Эта дисциплина обслуживания при ограниченном ресурсе транспортной сети связи дает возможность гибко распределять ресурсы маршрутизатора и канала. Однако в настоящее время CBWFQ, как правило, не используется из-за сложности определения оптимального количества выбираемых пакетов из приоритетных очередей [3, 4].

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОПОРЦИИ

В маршрутизаторе формируются очереди пакетов в соответствии с содержимым поля TOS (Type of service), которое предназначено для маркировки класса трафика. Входящие пакеты поступают во входную очередь (входной буфер) маршрутизатора, после которого распределяются по приоритетным очередям.

Допустим, что приоритетных очередей три. Согласно CBWFQ из первой очереди (трафик реального времени) выбирается N_1 пакетов, из второй очереди (эластичный трафик) – N_2 пакетов, из третьей очереди (потокотный трафик) – N_3 пакетов. Если очередь опустошается раньше, чем выбрано N_i , $i=1, 2, 3$ пакетов, то начинается выбор пакетов из следующей очереди. На рис. 1 представлена структурная модель маршрутизатора, использующая CBWFQ.

При построении аналитической модели допустим, что поток пакетов в точках А, В, С является пуассоновским. Каждая приоритетная очередь пакетов совместно с каналом связи представляет собой смешанную систему массового обслуживания (СМО): приоритетная очередь имеет ограниченную длину, для пакета задается величина тайм-аута – ограничение на время его пребывания в очереди.

Условимся считать, что на вход приоритетной очереди поступает простейший поток пакетов с плотностью λ . Время обслуживания одного пакета $T_{об}$ имеет показательное распределение с параметром $\mu=1/M[T_{об}]$. Поступающий пакет становится в очередь и ожидает начала своего обслуживания. Время ожидания ограничено величиной тайм-аута $T_{ож}^*$. Если до истечения этого срока пакет не будет принят к обслуживанию, то он покидает очередь и остается необслуженным. Срок ожидания $T_{ож}$ будем считать распределенным по показательному закону $h(t)=\nu e^{-\nu t}$, ($t>0$), где параметр ν – величина, обратная среднему сроку ожидания, $\nu=1/M[T_{ож}]$.



Рис. 1. Структура модели маршрутизатора при справедливой дисциплине обслуживания

Рассмотрим систему массового обслуживания «приоритетная очередь – канал связи». Очевидно, что в маршрутизаторе таких систем будет три – по числу приоритетных очередей.

Известно [5], что при показательном законе распределения срока ожидания пропускная способность системы не зависит от того, обслуживаются ли пакеты в порядке очереди или в случайном порядке: для каждой заявки закон распределения оставшегося времени ожидания не зависит от того, сколько времени заявка уже стояла в очереди. Это позволяет в качестве дисциплины обслуживания пакетов в каждой приоритетной очереди принять FIFO (first in, first out – «первым пришел, первым ушел или обслужен»).

Зададим состояния системы: x_0 – канал связи не занят, очереди нет; x_1 – канал связи занят, очереди нет; x_{1+s} – канал связи занят, s пакетов стоят в очереди. Вероятности нахождения СМО в соответствующих состояниях обозначим $p_0, p_1, p_{1+1}, p_{1+s}$.

Благодаря допущению о пуассоновском характере всех потоков событий, приводящих к изменению состояний системы, протекающий в ней процесс будет марковским.

Вместо плотностей λ и ν используем относительные плотности: $\alpha = \lambda/\mu$, $\beta = \nu/\mu$. В нашем случае прибор обслуживания (канал связи) один, т.е. $n=1$.

Ниже приведены выражения для вероятностей состояний системы [6]:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}.$$

$$p_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}, \quad (0 \leq k \leq n). \quad (1)$$

$$p_{n+s} = \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \frac{\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}, \quad (s \geq 1). \quad (2)$$

Математическое ожидание числа пакетов, находящихся в очереди, определяется выражением

$$M[s] = \sum_{s=1}^{\infty} s p_{n+s}. \quad (3)$$

Математическое ожидание времени начала обслуживания пакета (времени нахождения пакета в очереди) имеет вид

$$M[T_{\text{ож}}] = \begin{cases} M[s] \cdot T_{\text{об}}, & \text{если } M[s] \leq L, \\ L \cdot T_{\text{об}}, & \text{если } M[s] > L. \end{cases} \quad (4)$$

Введем ограничение на длину приоритетной очереди. Пусть L – ее максимальная длина (количество мест в очереди). Вероятность того, что пакет получит отказ в обслуживании из-за отсутствия свободных мест в очереди определяется выражением

$$P_{\text{отк}} = \sum_{s=L}^{\infty} p_{n+s}. \quad (5)$$

При качественном обслуживании пакетов математическое ожидание времени начала обслуживания пакета будет меньше величины тайм-аута $T_{\text{ож}}^*$ и соответственно выполняются неравенства:

$$M[T_{\text{ож}}] < T_{\text{ож}}^* \text{ и } P_{\text{отк}} \leq P_{\text{отк}}^*. \quad (6)$$

Обозначим интенсивность передачи пакетов в канале связи μ_{Σ} , а интенсивности выбора пакетов из приоритетных очередей μ_1 , μ_2 , μ_3 соответственно. Очевидно, что

$$\mu_{\Sigma} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3. \quad (7)$$

Имея аналитическую модель обслуживания пакетов в маршрутизаторе, представленную формулами (1) – (5), можно определить оптимальное соотношение (пропорцию) интенсивностей обслуживания (выбора) пакетов в приоритетных очередях $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3$.

Перебирая значения μ_1 , μ_2 , μ_3 с учетом условия (7) для каждой комбинации μ_1 , μ_2 , μ_3 необходимо вычислить значения $M_i[T_{\text{ож}}]$ и $P_{\text{отк}i}$, $i=1, 2, 3$.

Лучшим соотношением $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3$ при выполнении условия (6) будем считать то соотношение, при котором

$$\min_i \left\{ \frac{M_i^*[T_{ож}] - M_i[T_{ож}]}{M_i^*[T_{ож}]} \right\} \xrightarrow{\mu_1, \mu_2, \mu_3} \max. \quad (8)$$

Таким образом, выражение (8) определяет постановку задачи оптимизации – определения лучшей дисциплины обслуживания пакетов из приоритетных очередей в зависимости от производительности канала связи.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА IP-ПАКЕТОВ РАЗНОРОДНОГО ТРАФИКА В МАРШРУТИЗАТОРЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ

Известно, что для трафика реального времени (первый приоритет) максимальные значения, согласно рекомендациям IYU-T I.380/Y.1540, составляют: время задержки – 0,4 с; вероятность отказа – 0,1 с. Для эластичного трафика (второй приоритет): время задержки – 3 с; вероятность отказа – 0,05 с. Для потокового трафика (третий приоритет): время задержки – 3 с; вероятность отказа – 0,1 с.

Основываясь на результатах контроля исходящего трафика, зададим следующие исходные данные: интенсивность поступления пакетов первого приоритета – 1160 пак/с, второго – 1560 пак/с, третьего – 312 пак/с. Время ухода по тайм-ауту равно максимальному времени задержки доставки пакета. Длина пакета 6400 бит. При производительности канала, определяемой как $10 \times E1$ бит/с, интенсивность обслуживания пакетов равна 3200 пак/с, соответственно, при $12 \times E1$ – 3840 пак/с, а при $14 \times E1$ – 4480 пак/с.

Оптимальная пропорция количества выбираемых пакетов из приоритетных очередей в зависимости от производительности канала связи представлена на рис. 2.

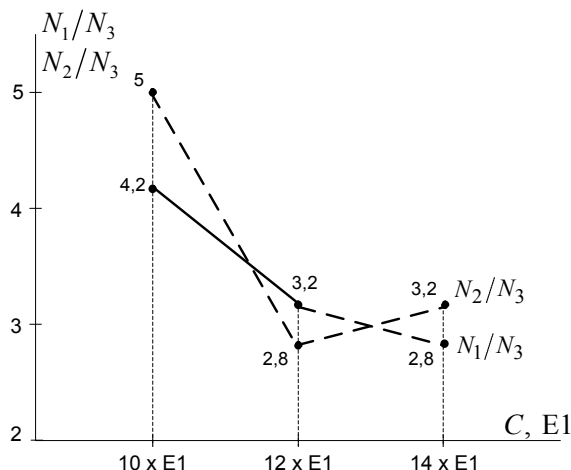


Рис. 2. Зависимость пропорции количества выбранных пакетов из приоритетных очередей от производительности канала связи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер зависимости оптимального отношения количества выбираемых пакетов из приоритетных очередей от производительности (пропускной способности) канала обусловлен двумя факторами.

Во-первых, оптимизируемая величина в выражении (8) по сути является временем, но выражена в относительных единицах для каждого типа трафика.

Во-вторых, при максимизации выбирается тот тип трафика, величина ожидания начала обслуживания пакетов которого минимальна.

В рассматриваемом примере при производительности канала $10 \times E1$ решение принято по пакетам потокового трафика, при $12 \times E1$ – по пакетам эластичного трафика, при $14 \times E1$ – по пакетам трафика реального времени.

Внесенная в модель погрешность, вызванная допущением о простейшем потоке пакетов, поступающих в приоритетные очереди маршрутизатора, может быть устранена, например интерполяцией результатов имитационного моделирования [7].

Предложенная процедура определения оптимальной пропорции выбора IP-пакетов при CBWFQ и выполнение требований к качеству их доставки позволит комплексно учесть приоритетность видео и речевого трафика, производительность маршрутизатора и канала связи, что в конечном итоге повысит качество видеотрансляции по сети при использовании протокола TCP/IP.

Список используемых источников

1. Бурлаков С.О., Митаки В.В., Попов С.С. Методика адаптивного распределения трафика между каналами связи // Труды ВАС имени С.М. Будённого: научно-технический сборник. – 2016. – № 94. – С. 84–91.
2. Бурлаков С.О., Попов С.С. Методика распределения разнородного трафика между каналами полевого узла связи // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2016. – Вып. 3 (26). – С. 55–61.
3. Заборовский В.С. Интеллектуальные системы управления информационными ресурсами в высокоскоростных телекоммуникационных сетях // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – С. 125–137.
4. Цветков К.Ю., Акмолов А.Ф., Викторов Е.А. Модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной системе спутниковой связи // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 3 (58). – С. 97–105.
5. Гордиенко В.Н., Твердовский М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 416 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит, 1962. – 267 с.
7. Бурлаков С.О., Попов С.С. Имитационная модель обслуживания разноприоритетного трафика с учетом его распределения между каналами связи. – URL: http://www.ofernio.ru/program/otapis_bd/db_printresult_user.php?page=0 (дата обращения: 22.11.2018).

К.И. Витензон;
А.П. Вышинский
Московская обл., Краснознаменск;
А.В. Колесник,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ВАЖНОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ

Предложен оригинальный подход к определению структурной устойчивости системы спутниковой связи, учитывающий важность передаваемой информации между потребителями. Прикладные задачи расчета показателей функционирования систем спутниковой связи находят широкое применение как при военно-научном обосновании тактико-технических характеристик, так и при выборе вариантов дестабилизирующих воздействий на системы управления войсками и оружием противника. Авторами в целях анализа сети спутниковой связи использовался программно-реализованный рекурсивный алгоритм «поиск в глубину», а также был разработан методический подход к ранжированию отдельных космических аппаратов с учетом их вклада в обеспечение функционирования системы спутниковой связи в целом.

Ключевые слова: система спутниковой связи, космический аппарат, структурная устойчивость, важность, рекурсивный алгоритм, ранжирование.

Развитие вооруженного противоборства в XXI в. связано с возрастанием роли космических средств в подготовке и ведении современных войн и вооруженных конфликтов любого масштаба и интенсивности.

Для эффективного применения высокотехнологичных средств поражения вооруженными силами зарубежных государств активно задействуются орбитальные группировки космических систем геопространственного, гидрометеорологического и навигационного обеспечения, а также связи и ретрансляции информации. При этом современные и перспективные спутниковые системы связи (ССС) будут являться ключевым элементом глобальных систем управления войсками и оружием [1] и повысят оперативность и непрерывность передачи информационных документов и доведения команд управления до потребителей.

В условиях наличия внешних дестабилизирующих факторов, в том числе возможных активных воздействий противника на космический сегмент, важнейшей задачей является анализ функционирования СССР с целью выявления критически важных элементов и подготовки рекомендаций по их защите или резервированию [2].

Задача определения живучести и устойчивости СССР с учетом дополнительных показателей, отражающих военно-прикладные аспекты применения средств связи, в том числе важности передаваемой информации, является актуальной.

Вместе с тем существующие методические средства определения устойчивости систем связи основаны на учете технической надежности, электромагнитной совместимости, криптостойкости и других показателей качества связи. При этом они в достаточной мере не учитывают структуру сети связи, а также дополнительные показатели, характеризующие объем и содержание передаваемой информации.

В целях устранения указанного недостатка усовершенствована существующая методика оценивания структурной устойчивости СССР.

Предлагаемая методика оценивания структурной устойчивости СССР основана на математическом аппарате теории графов и нахождении связности между элементами графа с помощью перебора простых цепей. На рис. 1 показаны формы представления структуры СССР (на рис. 1,а – структурная схема СССР, на рис. 2,б – граф СССР).

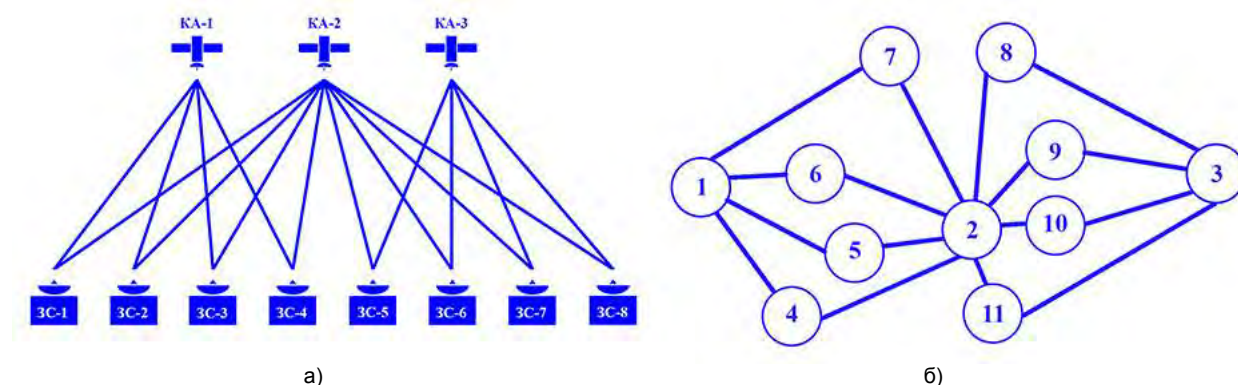


Рис. 1. Формы представления структуры спутниковой системы связи:
а – структурная схема ССС; б – граф ССС

Исходными данными являются:

- множество космических аппаратов (КА): $A = \{a_l\}$, $k \in L$;
- множество земных станций (ЗС): $B = \{b_m\}$, $l \in M$;
- матрица связности, квадратная матрица порядка $N = L + M$: $C_N = \|c_{ij}\|$, $i, j \in N$;
- множество коэффициентов технической готовности узлов связи и линий связи: $K_r = \{k_{i,j}\}$;
- множество коэффициентов важности информации, передаваемой ЗС абонентами: $W = \{w_{i,j}\}$.

Требуется найти структурную устойчивость (U) с учетом коэффициентов технической готовности и важности, а также выполнить ранжирование КА относительно вклада в структурную устойчивость ССС:

$$P = f(A, B, C, K_r, W).$$

Методика выполняется в четыре этапа.

На первом этапе моделируется граф сети связи (рис. 1,б), вершинами и ребрами которого являются узлы и линии связи; строится матрица инцидентности (связности), в которой указываются связи между элементами сети связи (ненулевое значение в ячейке матрицы указывает на связь между вершиной и ребром); вводятся коэффициенты технической готовности для узлов и линий связи, определяющие их структурную устойчивость к внешним дестабилизирующим факторам (коэффициенты технической готовности элементов сети находят в соответствии с паспортными данными на оборудование, данные коэффициенты являются вероятностью того, что объект находится в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объектов по назначению не предусматривается); определяются коэффициенты важности информации, передаваемой ЗС.

На рис. 1,б представлен граф сети связи. Узлы 1–3 являются космическими аппаратами связи, а 4–11 – земными станциями.

На втором этапе отмечаются все пути графа, по которым может быть установлено соединение. В предлагаемом подходе для поиска простых цепей в неориентированном графе использовался рекурсивный алгоритм «поиск в глубину» (англ. depth-first search, DFS).

На третьем этапе определяется связность сети между выделенными узлами. Связность рассчитывается методом объединения простых цепей при заданных коэффициентах технической готовности для всех элементов графа и с учетом важности передаваемой ЗС. В реальных условиях цепи часто взаимосвязаны, т.е. имеют общие ребра и вершины. При этом значение вероятности связности завышается. Поэтому при расчетах исключают события многократного учета коэффициента технической готовности. Такую операцию называют поглощением и обозначают символом E .

Показатели структурной устойчивости сети связи носят вероятностный характер [3], и их оценка осуществляется расчетным путем. Формула для вычисления вероятности связности линий связи принимает следующий вид:

$$\rho_{ij} = E \left\{ 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} (1 - p_{ij}^k) \right\} = E \left\{ 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} \left(1 - \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} \rho_a \right) \right\}, \quad (1)$$

- где ρ_{ij} – вероятность связности линии связи (связь от i -го узла к j -му);
 ρ_a – коэффициент технической готовности a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути μ_{ij}^k ;
 p_{ij}^k – связность k -го пути μ_{ij}^k из перечня всех простых цепей μ_{ij} ;
 E – исключение события многократного учета (операция поглощения).

Для оценки структурной устойчивости всей ССС введем среднесетевую вероятность связности, при этом следует указать на допущение о равнозначности различных линий связи. Формула среднесетевой вероятности связности имеет вид [4]:

$$P_{\text{ССС}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij}, \quad (2)$$

Однако линии связи имеют неодинаковую важность и для учета их различного вклада в общий показатель структурной устойчивости (2) введем весовые коэффициенты важности W_{ij} для каждой линии связи [5]:

$$P_{\text{ССС}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \cdot \rho_{ij}, \quad (3)$$

Частным случаем для выбора весового коэффициента W_{ij} может являться назначение весовых коэффициентов важности по рекуррентному правилу:

$$W_i = (L + 1 - i) / \sum_{l=1}^L l, i = 1, 2, \dots, L, \quad (4)$$

где L – число линий связи, упорядоченных по важности.

На четвертом этапе производится ранжирование космических аппаратов с учетом их вклада в структурную устойчивость ССС.

В случае воздействия дестабилизирующих факторов на ССС могут быть введены критерии и градации уровней ущерба ССС, представленные в табл. 1. [1]

Таблица 1

Градации уровней ущерба ССС

Уровень воздействия	Ущерб, причиняемый элементам ССС воздействием, %	Уровни нарушения безопасности ССС
Высокий	До 50	Высокий
Средний	До 30	Умеренный
Низкий	До 10	Низкий

Предложенная система показателей и критериев служит дополнением для качественной оценки степени достижения определенной в руководящих документах цели радиоэлектрон-

ного противодействия космическим средствам – дезорганизации управления войсками и оружием противника.

Приведем расчетный пример оценивания структурной устойчивости ССС с учетом важности передаваемой информации.

В состав ССС входят 3 КА ретрансляции информации и 8 ЗС, обеспечивающих наземных абонентов инфотелекоммуникационными услугами.

Для графа сети, изображенного на рис. 1,б, вычислено количество простых цепей при помощи алгоритма DFS. Количество простых цепей составило 544. По требованиям к устойчивости функционирования сети связи значение коэффициента технической готовности узлов и линий связи было выбрано 0,9.

Структурная устойчивость между узлами ССС, определяемая по формуле (1), представлена в табл. 2.

Таблица 2

Вероятность связности узлов ССС

Узлы связи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0,615	0,411	0,117	0,865	0,865	0,503	0,670	0,670	0,670	0,670
2	0,615		0,590	0,117	0,865	0,865	0,503	0,859	0,859	0,859	0,478
3	0,411	0,590		0,078	0,653	0,653	0,653	0,859	0,859	0,859	0,478
4	0,117	0,117	0,078		0,096	0,096	0,096	0,118	0,118	0,118	0,063
5	0,865	0,865	0,653	0,096		0,759	0,759	0,825	0,825	0,825	0,572
6	0,865	0,865	0,653	0,096	0,759		0,759	0,825	0,825	0,825	0,572
7	0,503	0,503	0,653	0,096	0,759	0,759		0,825	0,825	0,825	0,572
8	0,670	0,859	0,859	0,118	0,825	0,825	0,825		0,749	0,749	0,749
9	0,670	0,859	0,859	0,118	0,825	0,825	0,825	0,749		0,749	0,749
10	0,670	0,859	0,859	0,118	0,825	0,825	0,825	0,749	0,749		0,749
11	0,670	0,478	0,478	0,063	0,572	0,572	0,572	0,749	0,749	0,749	

Среднесетевая вероятность связности ($P_{\text{ССС}}$) [5], вычисленная по формуле (2) равна 0,724.

Произведем ранжирование линий связи по важности (табл. 3). Важность линии связи оценивается по шестибальной шкале (5 – очень высокая, 4 – высокая, 3 – средняя, 2 – ниже среднего, 1 – низкая, 0 – не востребуемое направление линии связи). После чего вычислим коэффициент важности линий связи по формуле (4). По данным из табл. 3 выполняется расчет структурной устойчивости по формуле (3). Результаты расчета представлены в табл. 4

Таблица 3

Ранжирование линий связи

КА	ЗС							
	4	5	6	7	8	9	10	11
1	4	1	1	4	0	0	0	0
2	1	2	5	5	5	2	2	1
3	0	0	0	0	3	4	4	3

Таблица 4

Структурная устойчивость с учетом коэффициента важности линий связи

Узлы связи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0,015	0,010	0,030	0,025	0,024	0,016	0,016	0,015	0,015	0,015
2	0,015		0,013	0,023	0,026	0,031	0,017	0,030	0,026	0,025	0,013
3	0,010	0,013		0,014	0,013	0,013	0,013	0,027	0,028	0,028	0,015
4	0,030	0,023	0,014		0,014	0,014	0,013	0,014	0,013	0,013	0,008
5	0,025	0,026	0,013	0,014		0,011	0,010	0,011	0,010	0,010	0,006
6	0,024	0,031	0,013	0,014	0,011		0,008	0,008	0,007	0,007	0,004
7	0,016	0,017	0,013	0,013	0,010	0,008		0,006	0,005	0,005	0,003
8	0,016	0,030	0,027	0,014	0,011	0,008	0,006		0,003	0,003	0,002
9	0,015	0,026	0,028	0,013	0,010	0,007	0,005	0,003		0,002	0,001
10	0,015	0,025	0,028	0,013	0,010	0,007	0,005	0,003	0,002		0,001
11	0,015	0,013	0,015	0,008	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	

Вероятность структурной устойчивости сети связи с учетом коэффициента важности равна 0,747.

На четвертом этапе рассчитаем вклад космических аппаратов в структурную устойчивость ССС. На рис. 2 представлены значения вклада КА в структурную устойчивость с учетом важности передаваемой информации.

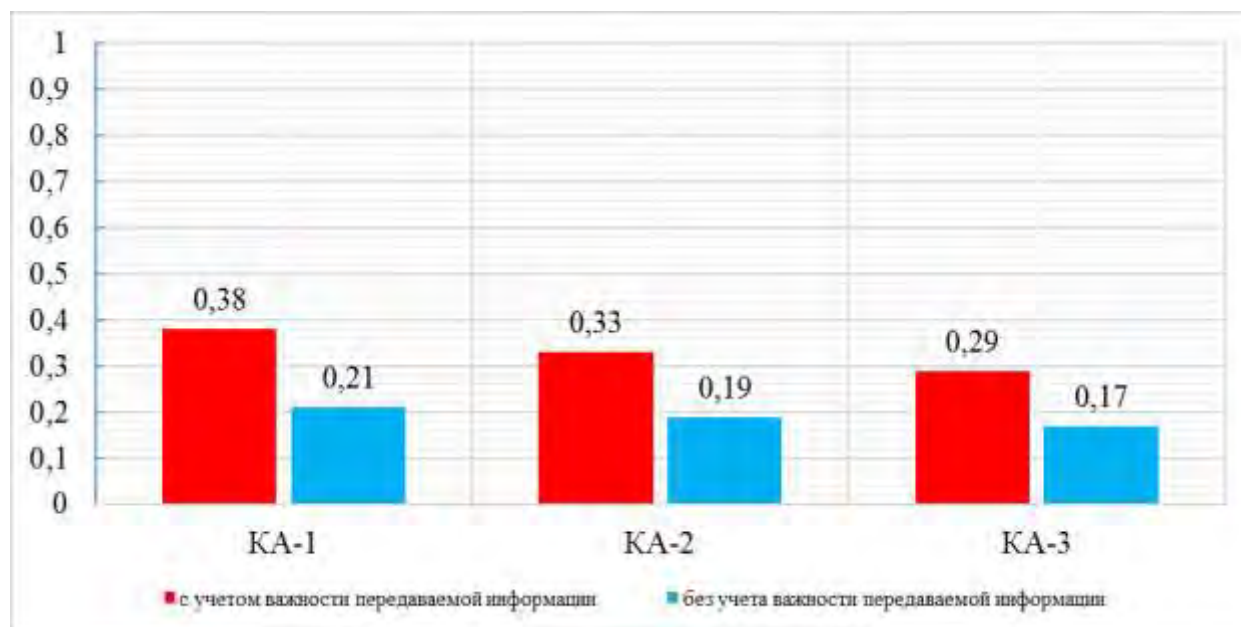


Рис. 2. Вклад КА в структурную устойчивость

Таким образом, получены оценки структурной устойчивости ССС с учетом важности передаваемой информации и возможной деградации орбитальной группировки КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные тенденции оценки обстановки показывают, что анализ и определение возможностей ССС на современном этапе требует расширения состава используемых показателей, в том числе учитывающих функциональную интеграцию ССС с системами управления войсками и оружием.

Одним из таких показателей является важность передаваемой информации, зависящая от уровня управления (стратегического, оперативного, тактического), объема передаваемых данных и эффективности действий обеспечиваемых спутниковой связью потребителей.

Предложенная методика программно реализована и используется при выполнении научных исследований в области оценки эффективности ССС в составе систем управления войсками и оружием при условиях наличия внешних дестабилизирующих воздействий и деградации космического сегмента.

Список используемых источников

1. Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2018. – М.: ООО «Компания Информационный мост», 2018. – 224 с.
2. Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2018. – М.: ООО «Компания Информационный мост», 2018. – 135 с.
3. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки: введ. в действ. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 декабря 2008 г. № 529-ст. – М.: Стандартинформ, 2009.
4. Косяков Е.Н., Родионов А.В., Цветков К.Ю. Сети связи и системы коммутации: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 329 с.
5. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.

А.П. Вышинский
Московская обл., Краснознаменск;
А.В. Колесник,
кандидат военных наук;
Э.М. Халиков,
кандидат техн. наук;
А.В. Чарушников,
доктор военных наук, профессор

НАПРАВЛЕНИЯ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СРЕДСТВ В КОМПЛЕКСАХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ЦЕНТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В публикации представлены сведения о результатах разработки программного комплекса моделирования применения космических систем и средств. Предложена технология оперативного формирования проблемно-ориентированных кроссплатформенных приложений. На основе имеющегося опыта применения и военно-научного сопровождения средств автоматизации приведены предложения по развитию программно-моделирующей базы проведения научных исследований и внедрения технологий моделирования в практическую деятельность должностных лиц центров управления Вооруженных Сил Российской Федерации.

Ключевые слова: моделирование, космические системы и средства, центры управления, инструментарий, программный комплекс, унификация.

Создание и применение современных высокотехнологичных образцов космических систем и средств (КСС) требует наличия постоянно развивающихся средств моделирования и проведения испытаний.

Анализ имеющегося научно-технического задела в области моделирования применения КСС показал избыточность, низкую эффективность и отсутствие унификации используемого в войсках и организациях промышленности специального программного обеспечения (СПО). Указанное обстоятельство связано с отсутствием в ракетно-космической отрасли единых нормативно-методических требований к разработке и применению средств моделирования КСС. Например, система общих технических требований к космическим средствам утверждена в 1988 г. и в настоящее время по ключевым направлениям не уточнялась. Положение о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов («Положение РК-11») не содержит требований к средствам математического и полунатурного моделирования КСС. Целевые показатели, приведенные в методических указаниях по подготовке предложений в Федеральную космическую программу и Государственную программу вооружения, не согласованы между собой, а некоторые из них не обладают практической направленностью.

При создании и применении КСС различной ведомственной принадлежности в целях подтверждения заявленных тактико-технических характеристик достаточно широко используются специализированные средства математического и программного обеспечения. Однако, как показывает практика военно-научного сопровождения СПО, развернутого в органах военного управления (ОВУ), научно-исследовательских организациях Минобороны (НИО МО) и организациях промышленности, оно не согласовано по целевым показателям, заложенным математическим моделям и алгоритмам, а также формам представляемых результатов.

В настоящее время на комплексах средств автоматизации (КСА) центров управления (ЦУ) Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) установлено аттестованное и принятое на

вооружение СПО, позволяющее моделировать отдельные задачи применения КСС. Для критически важных элементов СПО выполняется комплекс мероприятий программно-алгоритмического обеспечения с целью поддержания моделей и алгоритмов в состоянии, обеспечивающем автоматическое (автоматизированное) решение функциональных задач, надежное управление средствами вооружения и устойчивый информационный обмен с взаимодействующими средствами вооружения. При этом на должностных лиц (ДЛ) возлагаются задачи алгоритмизации и программирования новых актуальных оперативно-тактических и вспомогательных задач. Однако в рамках решения перечисленных направлений деятельности взаимодействие между разработчиками СПО, ОВУ и НИО МО, осуществляющими военное-научное сопровождение разработки СПО, не налажено.

Вместе с тем отсутствие программно-реализованных функциональных задач аналитической обработки информации в ОВУ приводит к тому, что командующие и их штабы даже при значительном располагаемом времени не могут объективно выполнить качественный анализ состава и возможностей КСС и, следовательно, правильно оценить складывающуюся обстановку, найти и принять рациональное решение.

Таким образом, в условиях создания в ВС РФ системы моделирования и необходимости непрерывного пополнения библиотеки алгоритмов и программ, а также потребности в повышении квалификации соответствующих ДЛ ЦУ ВС РФ задача разработки и применения единых технологий моделирования КСС является крайне актуальной.

Учитывая указанные обстоятельства, во 2-м управлении военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского на основе имеющегося опыта проведения научных исследований в области обоснования направлений развития КСС разработан и используется программный комплекс моделирования.

Основным предназначением комплекса является оперативная разработка проблемно-ориентированных приложений для моделирования применения наземных и орбитальных группировок КСС, решающих различные военно-прикладные задачи, в соответствии с заданным заказчиком исследовательским сценарием.

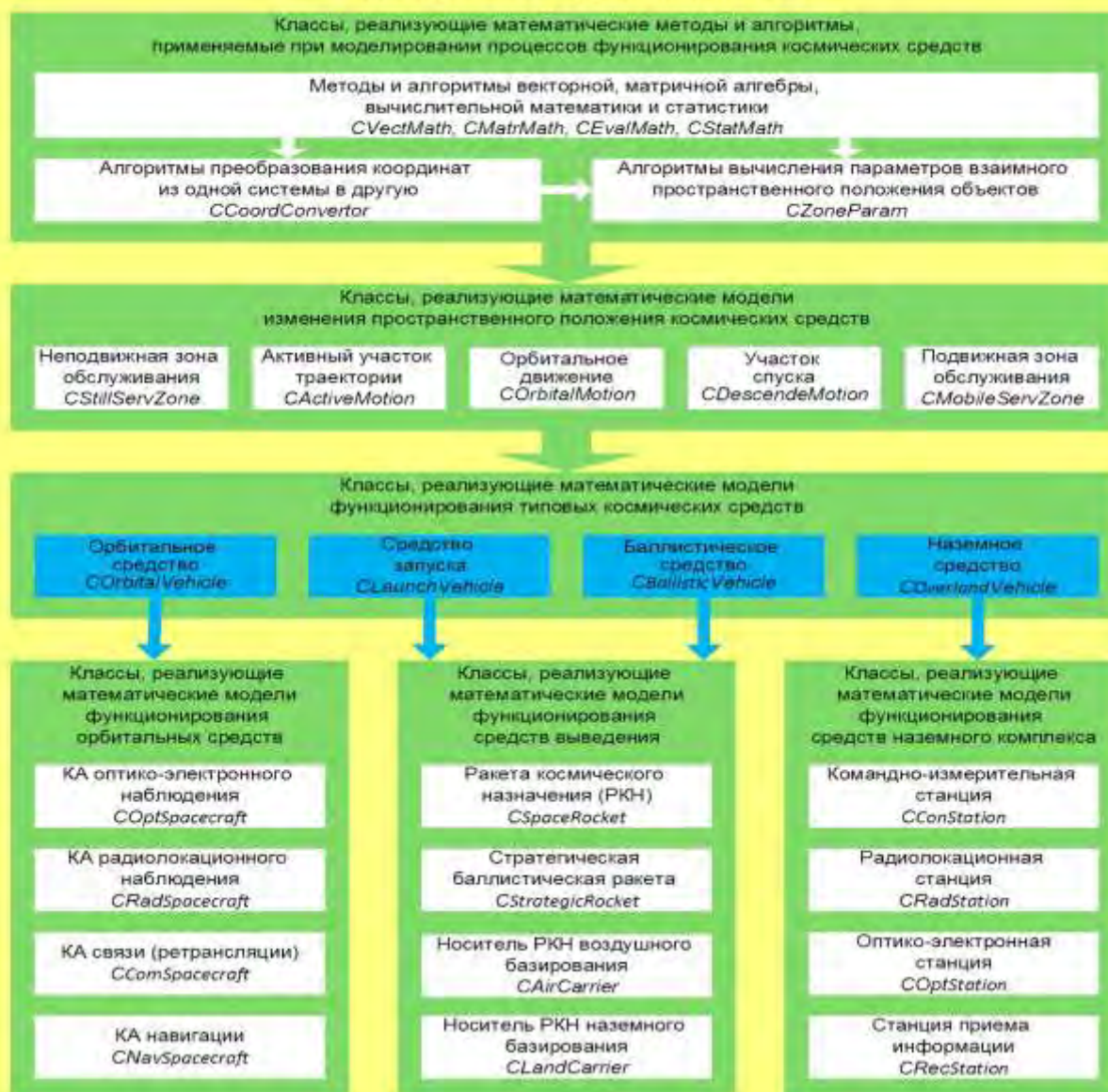
Комплекс (рис. 1) включает в свой состав два компонента:

- инструментарий программных средств моделирования применения КСС, представляющий собой унифицированную кроссплатформенную библиотеку классов, реализующих методы, алгоритмы и модели применения отдельных космических средств;
- инструментарий моделирования применения КСС вооружения в действиях ВС РФ, представляющий собой совокупность проблемно-ориентированных приложений, реализующих модели и методики применения космических систем (комплексов) определенного назначения в различных условиях оперативно-стратегической обстановки.

Проблемно-ориентированная программная реализация математических моделей комплекса выполняется на единой информационной и алгоритмической основе, учитывающей общие черты и особенности функционирования космических средств различного целевого назначения. В основу инструментария программных средств заложены математические методы баллистики, теорий информационных систем и радиосвязи, матричных вычислений и теории графов. Разработка отдельных компонентов завершается процедурой тестирования и проверки математических моделей на адекватность, вариативность и вычислимость.

Выбранный подход основан на технологии объектно-ориентированного программирования и позволяет моделировать космические средства различного целевого назначения, в том числе многофункциональные. Разработка новых классов осуществляется в соответствии с основными принципами структурирования предметной области, включающими инкапсуляцию, полиморфизм и наследование. Для проверки сходимости математических методов и алгоритмов компьютерных моделей используются основанные на библиотеке открытого кода зарубежные программные средства STK (Systems Tool Kit) и GMAT (General Mission Analysis Tool), находящиеся в свободном доступе.

Комплекс инструментальных программных средств моделирования применения КСС



Комплекс программ моделирования применения космических систем

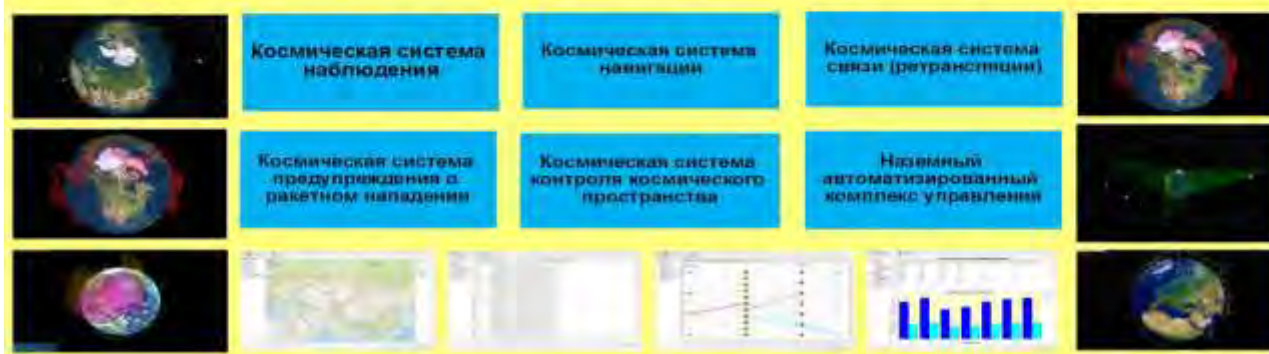


Рис. 1. Состав программного комплекса моделирования применения КСС

В нижней части рис. 1 представлен состав задач моделирования применения КСС, программно-реализованных с использованием комплекса инструментальных программных средств. Указанные задачи моделирования используются при моделировании системы контроля космического пространства, системы предупреждения о ракетном нападении, наземного автоматизированного комплекса управления и ракетно-космического комплекса, систем спутниковой связи, космических систем информационного обеспечения применения войск и оружия.

Практическая апробация разрабатываемых технологий подтверждает эффективность избранного пути развития базы моделирования. Впервые данный комплекс был представлен в 2014 г. командующему Космическими войсками. В настоящее время комплекс прошел апробацию в рамках демонстрации на заседаниях Коллегии МО РФ, Дне инноваций Министерства обороны Российской Федерации и Международных военно-технических форумах «Армия-2017, -2018, -2019».

Программный комплекс используется при выполнении научно-исследовательских работ, в том числе при военно-научном сопровождении опытно-конструкторских работ по разработке автоматизированных систем органов военного управления, а также при подготовке адъюнктов и соискателей ученых степеней.

Существующий задел и перспективы развития комплекса обеспечивают возможности решения таких базовых прикладных задач, как:

- выполнение оперативно-стратегических расчетов по оценке возможностей космических сил и средств и выработке решения на их применение в действиях ВС РФ в центральных органах военного управления;
- выполнение научно-исследовательских работ и разработка уставных (руководящих) документов в ходе обоснования форм и способов применения космических сил и средств в действиях ВС РФ в научно-исследовательских организациях МО РФ;
- обоснование оперативно-тактических и тактико-технических требований к отдельным космическим средствам и космическим системам (комплексам) в целом в научно-исследовательских организациях МО РФ и на предприятиях промышленности при выполнении НИОКР по разработке космических систем (комплексов).

Значительный количественный состав и возросшая структурная сложность СПО программного комплекса предопределили создание на его основе единого кластера моделирования, представляющего собой совокупность программных и аппаратных средств, предназначенных для решения полного спектра задач моделирования КСС.

Военно-научное сопровождение работ по анализу полноты перечня информационно-расчетных задач и математических моделей СПО программно-аппаратного комплекса (ПАК) Национального центра управления обороной Российской Федерации показало однозначную взаимосвязь между функциями СПО КСА ЦУ ВС РФ и программного комплекса моделирования КСС, разработанного в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. По состоянию на 2019 г. в состав СПО ПАК НЦУО РФ включено более 1100 математических моделей, подлежащих программной реализации и решающих функциональные задачи по моделированию КСС и оценке их вклада в эффективность применения войск и оружия. Результаты анализа структуры и содержания СПО выявили наличие задач моделирования КСС, как в составе центров управления космических войск (ЦУ КВ), применяющих специальные информационно-управляющие системы, так и в составе центров управления объединенных стратегических командований (ЦУ ОСК), использующих информационные ресурсы космических систем.

С учетом имеющегося в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского задела в области моделирования КСС представляется целесообразным совместное применение и развитие программно-реализованных математических моделей СПО, установленного на КСА ЦУ ВС РФ.

На рис. 2 предложен вариант распределения функциональных задач создаваемого кластера моделирования применения КСС, разворачиваемого в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, по задачам ЦУ ВС РФ.

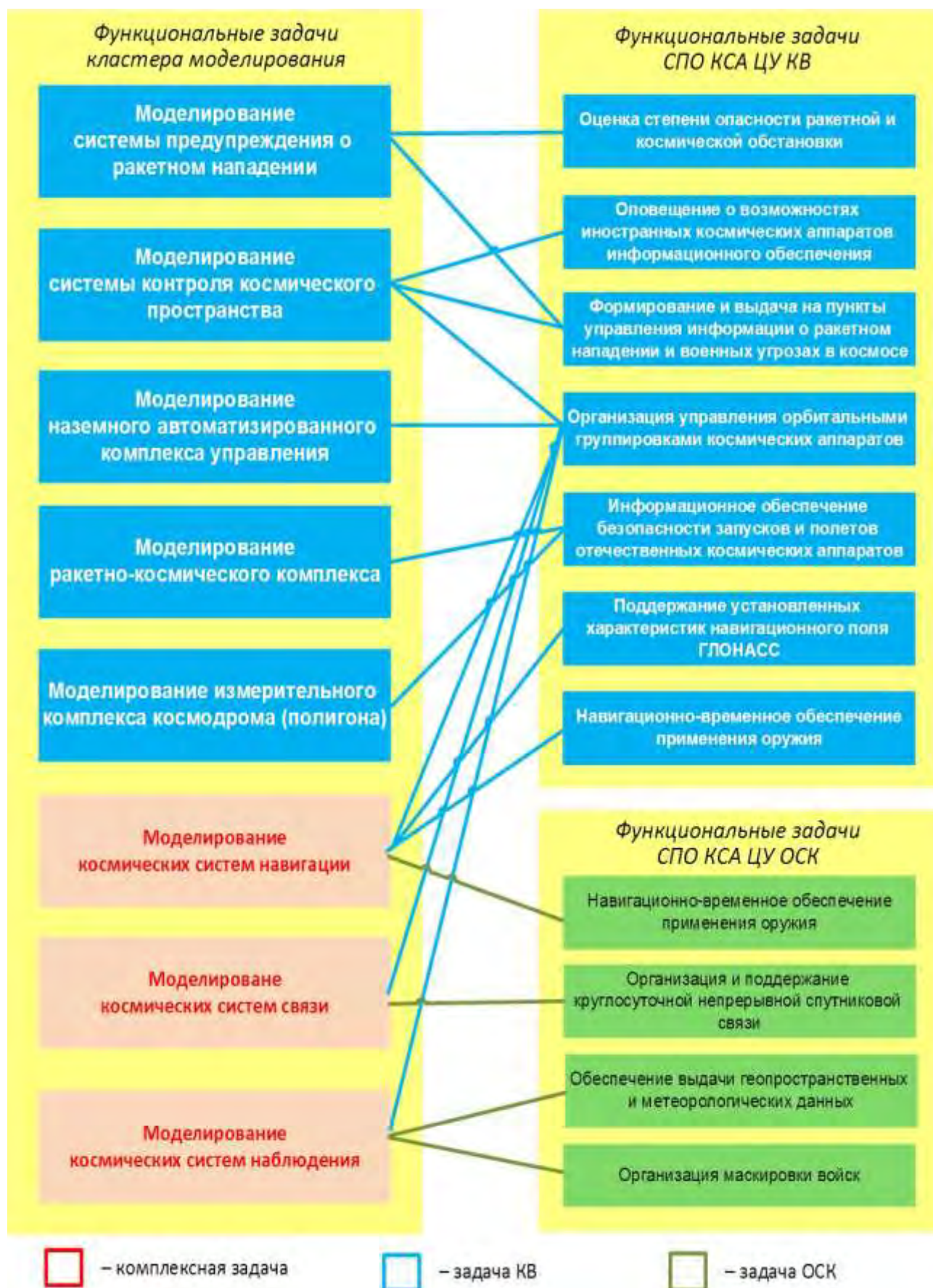


Рис. 2. Взаимосвязь функциональных задач кластера моделирования и ЦУ ВС РФ

Решение функциональных задач СПО КСА ЦУ ВС РФ при их создании (модернизации) может быть реализовано на стендах главных конструкторов КСС. Для критически важных КСС могут проводиться дополнительные работы по согласованию и калибровке моделей совместно заказчиками (потребителями) создаваемых КСС, организациями-разработчиками КСС и организациями, осуществляющими военно-научное сопровождение.

В СПО КСА ЦУ КВ должны решаться следующие функциональные задачи:

- оценка степени опасности ракетной и космической обстановки;
- оповещение о возможностях иностранных космических аппаратов информационного обеспечения;
- формирование и выдача на пункты управления государства и Вооруженных сил информации о ракетном нападении противника и военных угрозах в космосе;
- информационное обеспечение безопасности запусков и полетов отечественных космических аппаратов;
- организация управления орбитальными группировками космических аппаратов;
- поддержание установленных характеристик глобального навигационного поля ГЛОНАСС;
- навигационно-временное обеспечение, специальные и другие задачи.

При применении КСС в интересах информационного обеспечения группировки войск на театре военных действий в СПО КСА ЦУ ОСК решаются следующие задачи:

- навигационно-временное обеспечение применения оружия;
- обеспечение выдачи геопространственных и метеорологических данных;
- организация и поддержание круглосуточной непрерывной спутниковой связи;
- организация мероприятий маскировки войск.

Учитывая межвидовую специфику применения КСС, функциональные задачи моделирования КСС в ЦУ ВС РФ подразделяются на задачи КВ, задачи ОСК и комплексные задачи, решаемые в интересах КВ и ОСК.

Содержательно моделирование КСС также может представляться не только как решение задачи обоснования рационального состава орбитальных и наземных группировок («синтез КСС»), но и как решение задачи оценивания возможностей КСС заданного состава («анализ КСС») и их вклада в эффективность применения войск и оружия.

Опыт применения КСА в практической деятельности показывает, что важнейшей задачей развития СПО КСА ЦУ ВС РФ является объединение организационных, технических и информационных ресурсов военных и гражданских организаций в единую технологию моделирования КСС.

Направлениями внедрения технологий моделирования КСС будут являться:

- информационное обследование ЦУ ВС РФ с целью определения уровня автоматизации деятельности ДЛ ОВУ и проблемных вопросов применения СПО;
- анализ потребностей ОВУ в математических моделях предметной области применения КСС;
- информационная поддержка неавтоматизированных функций ДЛ ЦУ ВС РФ с использованием программно-реализованных моделей, разработанных в НИО МО;
- согласование и калибровка моделей ОВУ, НИО МО и организаций промышленности, реализующих схожие функциональные задачи;
- поддержание в актуальном состоянии баз реальных и условно-реальных данных для применения математических моделей;
- тестирование математических моделей при переводе СПО на современные, в том числе отечественные, аппаратно-программные платформы;
- проверка эргономической эффективности диалоговых интерфейсов СПО и технических средств КСА ЦУ ВС РФ.

В целях обеспечения обработки реальной и условно-реальной информации в СПО ЦУ ВС РФ и программных комплексах НИО МО представляется необходимым разработка положений и протоколов информационно-технического взаимодействия, обеспечивающих взаимный обмен исходными данными, сценариями применения КСС и результатами моделирования.

Таким образом, задача внедрения технологий моделирования КСС в СПО КСА ЦУ ВС РФ является актуальной и осуществимой при активном взаимодействии заказчиков, потребителей и научно-исследовательских организаций, ответственных за создание и развитие СПО.

В современных условиях развития системы моделирования ВС РФ решение обозначенных задач имеет приоритетное значение при повышении уровня автоматизации системы управления войсками и оружием. В свою очередь, наиболее важными направлениями внедрения технологий моделирования КСС будут являться унификация СПО и оперативная разработка проблемно-ориентированных приложений, востребованных для автоматизированной поддержки информационно-расчетной и логико-аналитической деятельности ДЛ ЦУ ВС РФ.

Список используемых источников

1. Задачи Воздушно-космических сил. – URL: <https://structure.mil.ru/structure/forces/vks/task.htm> (дата обращения: 25.05.2019).
2. Колесник А.В., Прокопенко Е.А., Янов С.В. Результаты разработки прикладного программного обеспечения во 2-м управлении военного института (научно-исследовательского) // Новатор. – 2016. – Вып. 34. – С. 56–61.
3. Наука и инновации в технических университетах: материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых / А.В. Чарушников, П.А. Проценко, М.Ю. Ортиков и др. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 64–66.

В.В. Звонарев,
кандидат техн. наук;
А.А. Ковальский,
кандидат техн. наук;
А.С. Попов,
доктор техн. наук, профессор;
В.А. Пряхин;
А.В. Шерстюк,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИЕМА СООБЩЕНИЯ В СПУТНИКОВОМ РАДИОКАНАЛЕ СВЯЗИ С МАЛЫМИ УГЛАМИ ВИЗИРОВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЗАМИРАЮЩЕЙ ПОМЕХИ

Рассматриваются спутниковые радиоканалы связи с малыми углами визирования при воздействии незамирающей помехи. Предлагаемая методика расчета позволяет учесть динамику мультипликативной помехи в спутниковом радиоканале связи и определить параметры радиоканала в присутствии незамирающей аддитивной помехи при расчете достоверности приема сообщения.

Ключевые слова: вероятность безобрывной связи, вероятность правильного приема сообщения, многомерная плотность вероятности, редуцированная мера, помеха, вероятность битовой ошибки, система передачи информации.

ВВЕДЕНИЕ

При организации связи в радиоканале между ретранслятором, находящимся на геостационарной орбите, и наземной станцией, расположенной в высокоширотных областях земного шара, а также в начале и конце сеанса связи с низко- и среднеорбитальными объектами углы места при их визировании имеют значения единиц и долей градуса. В этих случаях неизбежно возникает мультипликативная помеха как результат флуктуаций коэффициента передачи радиоканала [1]. Качество передачи информации существенно ухудшается. Механизм и степень влияния аддитивных преднамеренных помех при этих условиях исследованы далеко не в полной мере. К тому же существуют два разных подхода к анализу совместного воздействия аддитивных и мультипликативных помех, отличающихся вероятностными моделями флуктуаций коэффициента передачи радиоканала.

В спутниковом радиоканале связи при наличии мультипликативной помехи обычно определяется средняя вероятность битовой ошибки. Причем вероятность ошибки приема информационного символа усредняется по одномерной вероятностной мере при принятии условия «локальной стационарности» [2], при постоянстве коэффициента передачи канала в конкретном сеансе связи, то есть в отсутствие флуктуаций. Такой подход учитывает далеко не всю информацию, характеризующую физический канал и, в частности, не учитывает динамические свойства флуктуаций коэффициента передачи радиоканала. Результаты вычисления с использованием одномерной плотности вероятности (ПВ) [по одному сечению времени], не предусматривающей, например, возможности срыва синхронизации при падении уровня сигнала ниже порогового и времени ее восстановления, не дают значения вероятности непрерывания связи даже на конечном временном интервале передачи сообщения.

Проведенный анализ работ [2, 3] показал, что при такой модели получаются разные величины показателей качества связи и пропускной способности одного и того же радиоканала связи даже при слегка отличающейся формализации постановки задачи расчета и в отсутствие аддитивной помехи. Модель канала в виде одномерной ПВ не является в полной мере

адекватной при расчете достоверности приема сообщения в спутниковом радиоканале связи с малыми углами визирования.

Таким образом, даже при отсутствии помехи в радиоканале связи общепринятая теория передачи дискретных сообщений в условиях воздействия мультипликативных помех имеет ограниченное применение и требует совершенствования.

Учет динамических характеристик флуктуаций коэффициента передачи канала при расчете достоверности приема сообщения, а не только битовой ошибки, можно осуществить с помощью математической модели радиоканала передачи сообщений на основе многомерной редуцированной вероятностной меры. В частности, в статье [3] приведена ранее неизвестная зависимость достоверности приема сообщения от отношения интервала корреляции случайного процесса флуктуаций к длительности сообщения.

Достоверность приема сообщения принимается равной произведению вероятности правильного приема сообщения при заданном пороговом уровне сигнала и показателе, названном здесь вероятностью безобрывной связи на длительности сообщения.

Под вероятностью безобрывной связи понимается вероятность того, что на заданном временном интервале сеанса связи уровень сигнала не опустится ниже порогового (заданного) уровня. Задача расчета вероятности безобрывной связи является необходимой и важной при обеспечении связи в динамических условиях обстановки [4, 5].

Использование предлагаемого показателя качества связи в радиоканале передачи информации при организации связи позволяет:

- без потери пропускной способности радиоканала с заданной вероятностью обеспечивать необходимое качество радиоканала в текущем времени;
- прогнозировать достоверность приема сообщения при использовании требуемых режимов передачи дискретных сообщений;
- избегать неоднозначности результатов расчета радиоканала;
- определять более точные значения характеристик радиоканала передачи сообщений на этапах проектирования и эксплуатации для разных условий и режимов приема.

ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИЕМА СООБЩЕНИЯ В СПУТНИКОВОМ РАДИОКАНАЛЕ СВЯЗИ С МАЛЫМИ УГЛАМИ ВИЗИРОВАНИЯ

Дано:

- 1) дискретно манипулированные сигналы с длительностью информационного символа T и мощностью P_c ;
- 2) незамирающая шумовая помеха мощности P_n в полосе частот сигнала;
- 3) двоичный ортогональный в усиленном смысле сигнал;
- 4) оптимальный некогерентный посимвольный прием;
- 5) функциональная зависимость средней вероятности ошибки приема информационного символа – $P_{ош}$ от соотношения сигнал/шум – h^2 .

Отношение сигнал/шум в полосе пропускания приемного тракта и в полосе частот сигнала вычисляется по формуле

$$h^2 = \frac{E}{N_0} = \frac{P_c T}{N_0} \approx \frac{P_c}{\Delta F N_0} = \frac{P_c}{P_{ш}},$$

где E – энергия информационного символа сигнала, дБ, $E = P_c T$;

ΔF – эффективная полоса частот сигнала, Гц, $\Delta F \approx 1/T$;

N_0 – односторонняя спектральная плотность собственных шумов на входе приемного устройства, Вт/Гц;

$P_{ш}$ – мощность собственных шумов в полосе частот сигнала, Вт, $P_{ш} = \Delta F N_0$.

Присутствие шумовой незамирающей помехи может быть отражено в отношении сигнал/(шум+помеха):

$$h_1^2 = \frac{P_c}{P_{\text{ш}} + P_{\text{п}}}.$$

Мощность помехи $P_{\text{п}}$ вычисляется по формуле

$$P_{\text{п}} = N_{\text{п}} \Delta F,$$

где $N_{\text{п}}$ – односторонняя спектральная плотность помехи, Вт.

Тогда соотношение сигнал/шум+помеха можно представить в следующем виде:

$$h_1^2 = \frac{P_c}{P_{\text{ш}} + P_{\text{п}}} = \frac{1}{\frac{P_{\text{ш}}}{P_c} + \frac{P_{\text{п}}}{P_c}} = \frac{1}{\frac{1}{h^2} + \frac{P_{\text{п}}}{P_c} + \frac{P_{\text{ш}}}{P_c}} = \frac{1}{\frac{1}{h^2} + a^2 \frac{1}{h^2}} = \frac{h^2}{1 + a^2},$$

где a^2 – отношение мощности незамирающей помехи к мощности шума в тракте приемного устройства, приведенной к его входу, $a^2 = P_{\text{п}} / P_{\text{ш}}$.

Требуется найти значение достоверности приема сообщения в спутниковом радиоканале связи с малыми углами визирования в условиях воздействия незамирающей помехи, т.е. вероятность того, что уровень сигнала будет превышать заданное пороговое значение в нескольких временных сечениях на длительности сообщения T , состоящего из n символов.

Наиболее показательные результаты расчета оказываются в наихудшем случае релеевских замираний.

Рассмотрим сообщение длительности T в двух временных сечениях.

ВЫВОД ФОРМУЛЫ ДВУМЕРНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ+ПОМЕХА

Для вывода формулы ПВ релеевского закона распределения величины h^2 в двух временных сечениях при наличии шумовой помехи необходимо выполнить следующее.

1. Вычислить коэффициент корреляции между случайными величинами μ_1 и μ_2 ($t+T$) в двух сечениях, например марковского случайного процесса, по формуле

$$R_0(T) = e^{-\ln 10 \frac{T}{\tau_0}}, \quad (1)$$

где τ_0 – интервал корреляции, с.

2. Выписать формулу двумерной ПВ Релея для $\mu(t)$ с учетом формулы (1):

$$w_2(\mu_1, \mu_2, R_0) = \frac{4\mu_1\mu_2}{\mu_0^4(1-R_0^2)} \exp\left(-\frac{\mu_1^2 + \mu_2^2}{\mu_0^2(1-R_0^2)}\right) I_0\left[\frac{2R_0\mu_1\mu_2}{\mu_0^2(1-R_0^2)}\right], \quad (2)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;

μ_0 – среднеквадратическое значение, $\mu_0 = \sqrt{\mu^2}$;

μ – модуль коэффициента передачи радиосигнала.

3. В соответствии с [2] произвести замену переменных:

$$h_i^2 = \mu_i^2 \frac{h_0^2}{\mu_0^2} = \varphi_i(\mu_i), \quad (3)$$

где $\varphi_i(\mu_i)$ – прямая функция преобразования;
 i – номер временного сечения, $i = 1, 2$.

Обратная функция преобразования будет иметь следующий вид:

$$\mu_i = \sqrt{\frac{\mu_0^2}{h_0^2}} \sqrt{h_i^2} - \varphi_i^{-1}(h_i^2). \quad (4)$$

4. Выписать формулу двумерной ПВ Релея (2) с учетом выражения (4) и якобиана преобразования:

$$w(h_1^2, h_2^2) = \frac{4 \frac{\mu_0^2}{h_0^2} \sqrt{h_1^2 h_2^2}}{\mu_0^4 (1 - R_0^2)} \exp \left(- \frac{\frac{\mu_0^2}{h_0^2} [h_1^2 + h_2^2]}{\mu_0^2 (1 - R_0^2)} \right) I_0 \left[\frac{2 R_0 \frac{\mu_0^2}{h_0^2} \sqrt{h_1^2 h_2^2}}{\mu_0^2 (1 - R_0^2)} \right] \frac{\mu_0^2}{h_0^2} \frac{1}{4 \sqrt{h_1^2 h_2^2}}. \quad (5)$$

Сократив подобные члены, выражение (5) можно записать в следующем виде:

$$w(h_1^2, h_2^2) = \frac{1}{h_0^4 (1 - R_0^2)} \exp \left(- \frac{h_1^2 + h_2^2}{h_0^2 (1 - R_0^2)} \right) I_0 \left[\frac{2 R_0 \sqrt{h_1^2 h_2^2}}{h_0^2 (1 - R_0^2)} \right]. \quad (6)$$

5. Ввести обозначение $h_{ni}^2 = \frac{h_i^2}{1 + a^2}$ – отношение сигнал/шум по мощности на входе приемного устройства, где при появлении шумовой помехи с параметром $a^2 = P_{\text{ш}} / P_{\text{сн}}$ эквивалентное отношение сигнал/шум по мощности уменьшается на величину $1 + a^2$. Произвести преобразование переменных.

Прямое преобразование примет вид

$$h_{ni}^2 = \frac{h_i^2}{1 + a^2} = \varphi(h_i^2). \quad (7)$$

Обратное преобразование с учетом выражения (7) вычисляется по формуле

$$h_i^2 = h_{ni}^2 (1 + a^2) = \varphi^{-1}(h_{ni}^2) \quad (8)$$

6. Подставив выражение (8) в формулу (6), вывести из релейской ПВ закон распределения для h_{n1}^2 и h_{n2}^2 при наличии шумовой помехи:

$$w(h_{n1}^2, h_{n2}^2) = \frac{(1 + a^2)^2}{h_0^4 (1 - R_0^2)} \exp \left(- \frac{(1 + a^2)(h_{n1}^2 + h_{n2}^2)}{h_0^2 (1 - R_0^2)} \right) I_0 \left[\frac{2 R_0 (1 + a^2) \sqrt{h_{n1}^2 h_{n2}^2}}{h_0^2 (1 - R_0^2)} \right]. \quad (9)$$

7. Для вычисления двумерной ПВ релейского закона распределения при воздействии шумовой помехи необходимо представить выражение (9) в следующем нормированном виде:

$$w \left(\frac{h_{n1}^2}{h_0^2}, \frac{h_{n2}^2}{h_0^2} \right) = \frac{(1 + a^2)^2}{1 - R_0^2} \exp \left(- \frac{(1 + a^2)}{1 - R_0^2} \left(\frac{h_{n1}^2}{h_0^2}, \frac{h_{n2}^2}{h_0^2} \right) \right) I_0 \left[\frac{2 R_0 (1 + a^2)}{1 - R_0^2} \sqrt{\frac{h_{n1}^2}{h_0^2} \frac{h_{n2}^2}{h_0^2}} \right]. \quad (10)$$

Известно, что отношение порогового значения сигнал/шум по мощности к среднему значению отношения сигнал/шум на входе приемного устройства есть величина, обратная ко-

эффиценту запаса k по мощности в радиоканале. Обозначим $\xi_1 = \frac{h_{n1}^2}{h_0^2}$ и $\xi_2 = \frac{h_{n2}^2}{h_0^2}$, где ξ_1, ξ_2 – случайные величины. Исходя из этого, выбираем пределом в интеграле заданную величину $1/k$.

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОБРЫВНОЙ СВЯЗИ В ДВУХ ВРЕМЕННЫХ СЕЧЕНИЯХ РЕЛЕЕВСКОГО РАДИОКАНАЛА СВЯЗИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЗАМИРАЮЩЕЙ ШУМОВОЙ ПОМЕХИ

Вероятность безобрывной связи в двух временных сечениях, как зависимость от коэффициента запаса, может быть рассчитана по формуле

$$P_{60} = \int_{1/k}^{\infty} \int_{1/k}^{\infty} w(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2. \quad (11)$$

Коэффициент запаса $k = (h_0^2/h_n^2)$ показывает, во сколько раз надо увеличить мощность передающего устройства в канале, чтобы обеспечить в среднем заданное значение вероятности безобрывной связи на длительности сообщения – T_c . В качестве h_n^2 принимается значение отношения сигнал/шум, при котором обеспечивается требуемое значение вероятности правильного приема сообщения P_{np} в отсутствие помех и при наличии собственного шума и помехи.

Для построения графиков расчеты вероятности безобрывной связи в двух временных сечениях релеевского канала при воздействии незамирающей помехи с учетом выражений (10) и (11) производятся по формуле

$$P_{60} = \int_{\frac{1}{k}}^{\infty} \int_{\frac{1}{k}}^{\infty} \frac{(1+a^2)^2}{1-R_0^2} \exp \left[\frac{-(\xi_1 + \xi_2)(1+a^2)}{1-R_0^2} \right] I_0 \left[\frac{2R_0(1+a^2)}{1-R_0^2} \sqrt{\xi_1 \xi_2} \right] d\xi_1 d\xi_2. \quad (12)$$

Из (12) видно, что наличие незамирающей помехи в условиях действия мультипликативной помехи приводит к существенным уменьшениям вероятности безобрывной связи.

РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПРАВИЛЬНОГО ПРИЕМА СООБЩЕНИЯ В ПРИСУТСТВИИ РЕЛЕЕВСКОЙ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ ПОМЕХИ И СОБСТВЕННОГО ШУМА

Для расчета средней вероятности правильного приема сообщения в канале без помех необходимо выполнить следующее:

1. Вычислить среднюю вероятность ошибки символа при когерентном приеме:

$$P_{ош} = \frac{1}{h_0^2 + 2},$$

где h_0^2 – среднее значение отношения сигнал/шум на входе приемного устройства при релеевских замираниях.

2. Вычислить среднюю вероятность правильного приема сообщения при независимости символов сообщения, как принято в существующей методике:

$$P_{прав} = (1 - P_{ош})^n,$$

где n – число элементарных символов в одном сообщении.

РАСЧЕТ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИЕМА СООБЩЕНИЯ В СПУТНИКОВОМ РАДИОКАНАЛЕ СВЯЗИ С МАЛЫМИ УГЛАМИ ВИЗИРОВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЗАМИРАЮЩЕЙ ПОМЕХИ ДЛЯ МНОГОМЕРНОЙ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ

Для того чтобы достоверность приема сообщения не становилась ниже порогового значения необходимо, чтобы отношение сигнал/шум не опускалось ниже заданного порога – $h^2_{\text{пор}}$ на длительности передачи сообщения – T_c , т.е. не происходило нарушения (обрыва) связи.

Строго говоря, методика позволяет рассчитать вероятность правильного приема сообщения длительностью T_c с вероятностью $P_{\text{бо}}$. Для упрощения принимаем, что достоверность приема сообщения (вероятность правильного приема сообщения) – P_d длительностью $T_{\text{сообщ}}$ и числом символов n вычисляется по формуле

$$P_d = P_{\text{бо}} P_{\text{прав}}.$$

Значения $P_{\text{бо}}$ и $P_{\text{прав}}$ определяются пороговым значением отношения сигнал/шум, т.е. $P_{\text{бо}}(h^2_{\text{пор}})$, $P_{\text{прав}}(h^2_{\text{пор}})$.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Для проведения расчетов в статье использовались следующие параметры:

- отношение длительность информационного символа к интервалу корреляции равно 1/30;
- отношение мощности аддитивной незамирающей помехи к мощности шума в тракте приемного устройства имеет значения 0 для $P1_{\text{бо}}(k)$; 1,5 для $P2_{\text{бо}}(k)$ и 2 для $P3_{\text{бо}}(k)$;
- число информационных символов в сообщении равно 350.

В результате вычислительного эксперимента в программной среде Mathcad получены зависимости вероятности правильного приема сообщения от коэффициента запаса в отсутствие и при наличии незамирающей помехи (рис. 1).

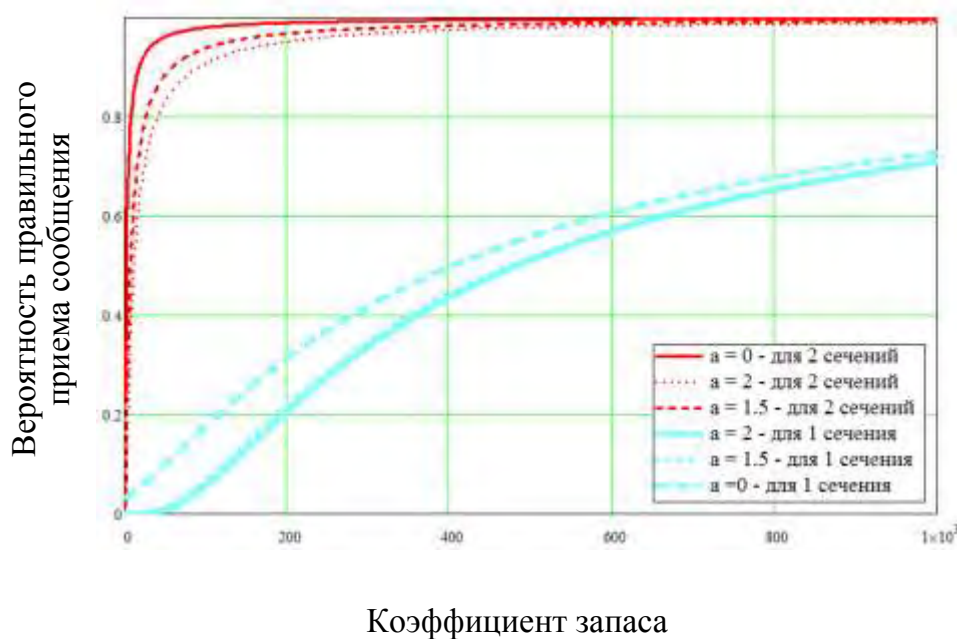


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного приема сообщения при моделях одного и двух временных сечений с релеевским законом распределения от коэффициента запаса при отсутствии и наличии незамирающей помехи

Проанализировав рис. 1, можно сделать следующие выводы.

1. Чем больше соотношение $a^2 = P_{\Pi} / P_{\text{ш}}$, тем больше требуется запас по мощности k при заданном значении вероятности правильного приема сообщения.

2. Учет динамических характеристик мультипликативной помехи позволяет получить требуемое значение вероятности правильного приема сообщения при меньшем значении коэффициента запаса.

На рис. 2 представлены результаты расчета вероятности правильного приема сообщения в спутниковом радиоканале связи с малыми углами визирования при воздействии незамирающей помехи при значении коэффициента запаса 50 дБ.

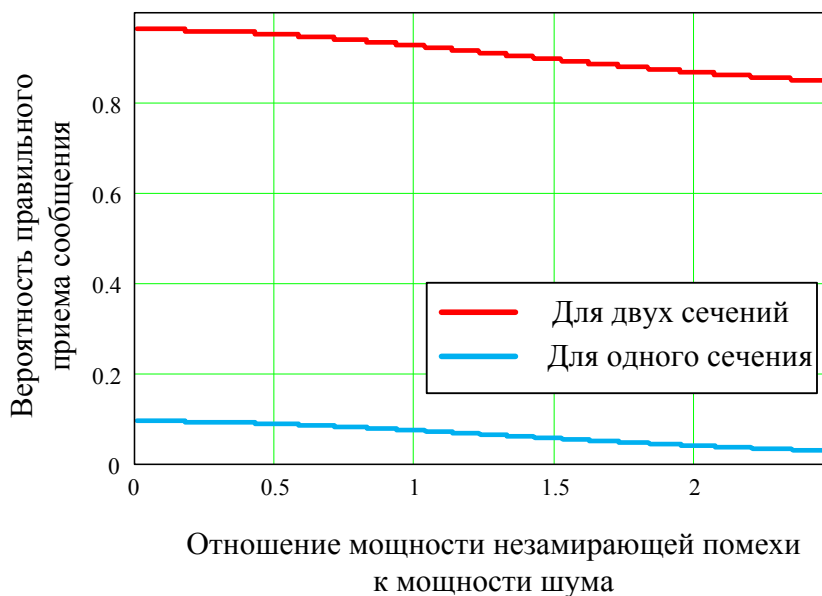


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного приема сообщения от относительного уровня незамирающей помехи

Проанализировав рис. 2, можно сделать следующие выводы.

1. Увеличение отношения мощности незамирающей помехи к мощности шума в тракте приемного устройства приводит к существенному ухудшению достоверности приема сообщения.

2. Требуемая достоверность приема сообщения достигается увеличением коэффициента запаса.

3. При традиционном подходе (одномерной модели) к расчету вероятности правильного приема сообщения влияние помехи оказывается существенно завышенным по сравнению с предлагаемой более адекватной многомерной вероятностью модели мультипликативной помехи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, новое содержание известного показателя качества связи – вероятность правильного приема сообщения, которая является также показателем качества приема сообщения в спутниковом радиоканале связи, заключается в том, что новым условием обеспечения требуемого качества канала является то, что уровень сигнала не должен становиться меньше заданного порогового значения.

При существующем подходе к расчету вероятности правильного приема сообщения используется статистика Бернулли, условием которой является независимость символов сооб-

щений, достигаемая введением перемежения. При этом расчетная пропускная способность радиоканала уменьшается примерно на порядок. Это является одним из показателей неадекватности бернуллиевской модели статистики в радиоканалах при наличии и отсутствии незамирающей помехи. Предлагаемая методика расчета не предполагает независимости принимаемых информационных символов в сообщении.

Список используемых источников

1. *Honde D.B., Theodold D.N. Devastirvatham D.N.J.* Amplitude scintillation AT 2 and 30 GHz on earth space paths // Commission F. Colloq. – 1977. – Vol. 4, № 9. – P. 421–425.
2. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. – 2-е изд. – М.: Сов. радио, 1970. – 728 с.
3. *Коричнев Л.П., Королёв В.Д.* Статистический контроль каналов связи. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.
4. *Звонарев В.В., Попов А.С.* Вероятность безобрывной связи как показатель эффективности канала с замираниями // Вопросы радиоэлектроники. – 2014. – № 1. – С. 103–106.
5. Вероятностная модель спутникового радиоканала связи при малых углах места / В.В. Звонарев, И.А. Карабельников, И.Ю. Парамонов и др. // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, вып. 2. – С. 38–42.

А.Ю. Коваленко,
кандидат техн. наук;
Е.Л. Коваленко;
С.В. Терещенко,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МОРСКОГО ФЛОТА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Проанализированы особенности навигационного обеспечения различных потребителей в Арктике. Выдвинуты предложения по организации информационно-навигационного обеспечения потребителей с использованием космических систем навигации и связи.

Ключевые слова: Арктика, навигация, передача информации.

ВВЕДЕНИЕ

С открытием в Арктическом регионе больших запасов углеводородов и других полезных ископаемых военно-политическое руководство ряда зарубежных стран стало активно разрабатывать новые стратегии продвижения своих национальных интересов в зоне Арктики.

Российская Федерация, как арктическое государство, имеет свои интересы в Арктической зоне Северного ледовитого океана. В соответствии с национальными интересами Российской Федерации в Арктике [1] основными задачами, определяющими стратегические приоритеты и механизмы реализации государственной политики Российской Федерации в данном регионе, являются:

- использование Арктической зоны Российской Федерации в качестве стратегической ресурсной базы Российской Федерации, обеспечивающей решение задач социально-экономического развития страны;
- сохранение Арктики в качестве зоны мира и сотрудничества;
- сбережение уникальных экологических систем Арктики;
- использование Северного морского пути в качестве национальной единой транспортной коммуникации Российской Федерации в Арктике.

Реализация национальных интересов Российской Федерации в Арктике обеспечивается институтами государственной власти совместно с институтами гражданского общества в строгом соответствии с законодательством Российской Федерации и ее международными договорами.

В сфере военной безопасности, защиты и охраны государственной границы Российской Федерации, пролегающей в Арктической зоне Российской Федерации, реализация национальных интересов, обеспечение благоприятного оперативного режима в Арктической зоне Российской Федерации требуют постоянного присутствия в Арктике Вооруженных Сил Российской Федерации, в первую очередь ВМФ.

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МОРСКОГО ФЛОТА

Экстремальные природно-климатические условия Арктической зоны Российской Федерации, заключающиеся в наличии постоянного ледового покрова на больших пространствах,

дрейфующих льдов, предъявляют повышенные требования к навигации надводных и особенно подводных кораблей ВМФ.

Отличие навигации в высоких широтах заключается в том, что из-за несовпадения магнитного полюса с географическим на широтах выше 85° использование таких приборов, как магнитные компаса и курсоуказатели невозможно. Для плавания в таких районах используется не географическая, а квазигеографическая система координат, в которой Северный полюс переносится в точку пересечения географического экватора с географическим меридианом 180° . Географические меридианы 90°E и 90°W используются в качестве квази-экватора, а географические меридианы 0 и 180° – в качестве начального квазимеридиана [2]. Инерциальные системы также являются малоэффективным средством навигации в высоких широтах [3].

Таким образом, на высоких широтах предпочтительным средством навигации являются спутниковые навигационные системы (СНС) ГЛОНАСС и GPS, которые обеспечивают навигацию в полном объеме. Обеспечение высокой точности навигации осуществляется путем использования приёмников, принимающих сигнал высокой точности (ВТ) поддиапазонов L1 или L2. Сигнал ВТ предназначен для использования в интересах Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ) и спецпотребителями по согласованию с МО РФ [4].

Для освоения Арктики и обеспечения функционирования в ней Вооруженных Сил Российской Федерации, особенно ВМФ, наряду с навигацией необходимо обеспечить информационное взаимодействие между центрами управления и отдельными потребителями. При большом удалении от центров для этих целей используются космические системы связи и ретрансляции с КА на геостационарных орбитах (MILSTAR/AEHF, DSCS/WGS, Луч, Экспресс и др.), на эллиптических орбитах (TacSat-4, Гео-ИК-2, Меридиан и др.) и низких круговых орбитах [система спутниковой связи (ССС) Globalstar, Iridium, многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС) «Гонец Д1М», «Родник» и др.]. КА связи на геостационарных орбитах не наблюдаемы в районе полюса. Геостационарный КА может быть наблюдаем только до широты 82° , поэтому организовать связь с помощью КА на стационарных орбитах в районах выше указанной широты невозможно. Использование систем связи на эллиптических орбитах из-за высокого апогея орбиты ограничивается требуемой мощностью радиоканала (приемо-передающей аппаратурой) и размерами антенны. В связи с этим организация связи потребителей с пунктами управления осуществляется с использованием космических систем связи на низких круговых орбитах Iridium, Гонец Д1М.

Перечисленные системы обеспечивают навигацию и обмен информацией надводных и воздушных потребителей, но не потребителей, находящихся под водой или подо льдом. Это объясняется плохой проникающей способностью высокочастотного радиосигнала, используемого в космических системах связи и навигации, через воду и лед. Таким образом, возникает проблема информационного и навигационного обеспечения потребителей, находящихся под водой или подо льдом.

ОСОБЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В настоящее время всплытие подводных объектов (подводных лодок) для обмена информацией с пунктами управления и определения своих координат приводит к обнаружению ее средствами космической разведки, поэтому проблему передачи информации подводному потребителю (для обеспечения скрытности потребителя) возможно решить, если на границу сред «воздух – вода» поместить устройство, преобразующее радиосигнал в гидроакустический сигнал, так как в водной среде единственным способом передачи информации является использование гидроакустического сигнала.

Спутниковые системы связи, функционирующие на низких круговых орбитах, имеют ряд

преимуществ, позволяющих технически реализовать устройство передачи радиосигнала по гидроакустическому каналу. К таким преимуществам относятся:

- невысокие массогабаритные характеристики приемо-передающей аппаратуры и спутниковой антенны (для МСПСС «Гонец Д1М» вес приемо-передающего блока – 100 гр, спутниковой антенны – от 100 до 15000 гр);
- наличие всенаправленной антенны, которая не требует сложных систем наведения и сопровождения КА;
- независимость приема и передачи сигнала низкоорбитальных систем спутниковой связи от характера ландшафта и растительности;
- высокая стабильность системы, поскольку даже отказ нескольких КА может повлиять только на увеличение времени ожидания связи, но не повлияет на стабильность системы в целом.

Для навигации подводного объекта, идущего на глубине до 250 м, возможно использовать всплывающие навигационные буи (ВНБ), которые свои координаты, определенные с помощью ГЛОНАСС/GPS, передают по гидроакустическому каналу на подводный объект. Постановка ВНБ выполняется с помощью штатных систем подводного объекта без осуществления всплытия. Прием информации с ВНБ осуществляется на дистанции до 5 км. При передаче координат ВНБ штатной гидроакустической навигационной системе подводного объекта производится замер дистанции и пеленга на ВНБ, по которым решается навигационная задача определения координат объекта. Предельная погрешность определения координат составляет не более 20 м. Схема использования ВНБ представлена на рис.1. В этом случае ВНБ выступает в роли навигационного псевдоспутника. Определение местоположения подводного объекта возможно в рамках уточнения координат, т.е. решения так называемой краевой задачи. В этом случае с помощью статистических методов происходит определение поправок к координатам объекта на основании обработки выборки измерений дистанции и пеленга на ВНБ.

При необходимости передачи информационных сообщений в центры управления целесообразно использовать всплывающие информационно-навигационные буи (ВИНБ), предназначенные для приема подводным объектом сообщений от КА «Гонец Д1М», а также передачи сообщений на КА «Гонец Д1М» с последующей доставкой их на береговые центры управления и навигации объекта в подводном положении.

С целью обеспечения скрытности подводных объектов в позиционных районах целесообразно использовать буи тактической пейджинговой системы связи [5], к которым относятся радио- и гидроакустические навигационные буи (РГНБ), способные обеспечивать связь с подводным объектом, находящимся в любой точке Мирового океана.

РГНБ предназначен для решения следующих задач:

- оборудования оперативных районов в Арктической зоне океана с привязкой к глобальным системам позиционирования;
- обеспечения оперативного обмена информацией между береговым, воздушным командными пунктами и подводным объектом, находящимся в подводном положении;
- координирования подводных объектов, находящихся в подводном положении, без всплытия на поверхность.

Наличие нескольких свободно дрейфующих РГНБ в позиционном районе способно повысить точность решения навигационной задачи за счет использования дистанции и пеленга от нескольких РГНБ. В данном случае несколько РГНБ представляют собой созвездие навигационных псевдоспутников. Однако данный подход сопряжен с рядом трудностей, в частности, в отличие от решения навигационной задачи по данным от спутников СНС количество РГНБ, выступающих в роли псевдоспутников, может быть недостаточным для определения местоположения подводного объекта. Также формируемое созвездие навигационных псевдоспутников может не обладать требуемым геометрическим фактором для определения координат с заданной точностью. Указанные проблемные ситуации требуют дополнительных исследований.

В позиционных районах с открытой водой целесообразно использование дрейфующих РГНБ (рис. 2), для позиционных районов, находящихся подо льдом, целесообразно использовать РГНБ, помещенный в защитный термобокс и устанавливаемый на льду.

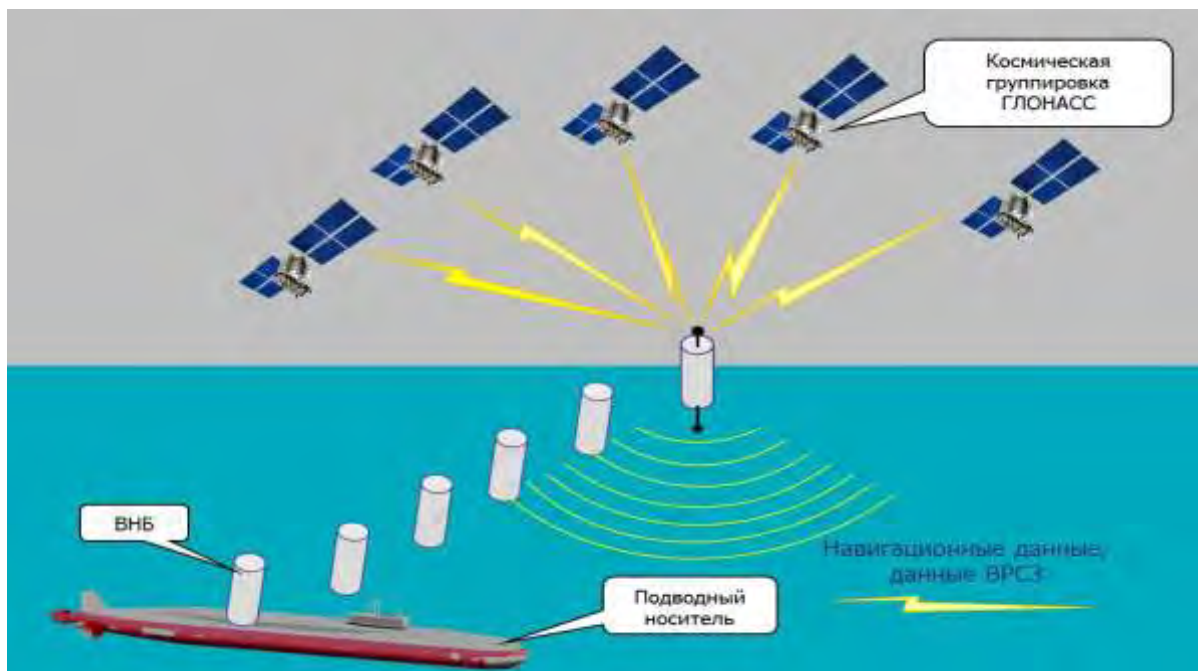


Рис. 1. Схема использования ВНБ

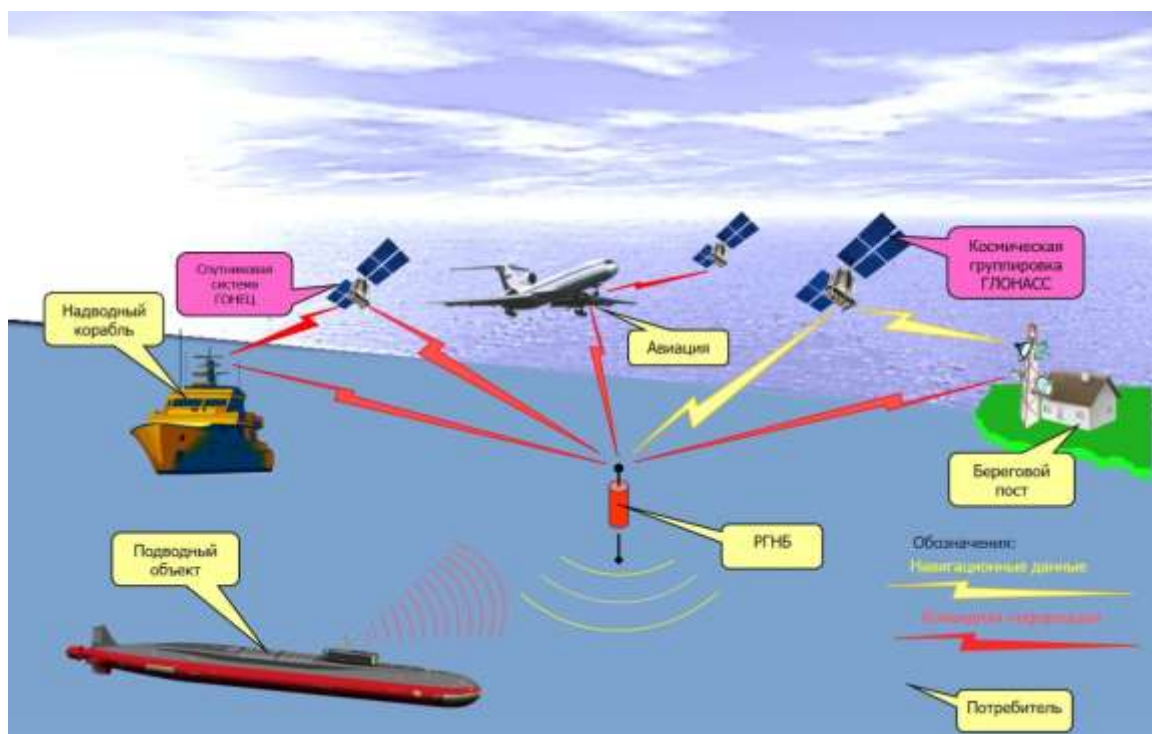


Рис. 2. Схема использования РГНБ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях Арктика приобретает всё большее значение в глобальной политике и экономике развитых государств Арктической зоны. Арктический регион становится важнейшей ареной взаимоотношений Российской Федерации с зарубежными партнерами в области международной и военной безопасности.

Нахождение подводного объекта в подводном состоянии обеспечивает ему скрытность и возможность при необходимости нанести ракетный удар по кратчайшему пути. Поэтому Арктический район рассматривается как важный позиционный район. Применение таких современных технических устройств передачи информации, как всплывающие информационно-навигационные и радио-, гидроакустические навигационные буи, позволяет передавать информацию от космических средств в подводной среде без осуществления всплытия. Таким образом, представляется возможным осуществление взаимодействия между объектами ВМФ и ВКС МО РФ на новом уровне, что позволяет увеличить эффективность действий ВМФ.

Список используемых источников

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу: утверждены Президентом РФ 18 сентября 2008 г. – URL:<http://docs.cntd.ru/document/902149373>. (дата обращения: 18.09.2008).
2. Дворкин В.В., Карутин С.Н., Куришин В.В. Методика мониторинга глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС с помощью системы дифференциальной коррекции и мониторинга // Измерительная техника. – 2012. – № 3. – С. 32–37.
3. Навигационные условия плавания в высоких широтах. – URL:<http://seaspirit.ru/> (дата обращения: 28.04.2018).
4. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП): интерфейсный контрольный документ (проект редакции 3.0). – М.: ОАО «НПК СПП», 2011. – 82 с.
5. Предварительные результаты мониторинга навигационных систем с использованием системы контроля целевых характеристик ГНС ГЛОНАСС / А.Н. Жуков, С.М. Зотов, В.В. Пасынков и др. // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2012. – № 23. – С. 189–195.

И.А. Козинков,
доктор техн. наук, доцент;
А.А. Левашко

АДАПТИВНЫЙ ВЫБОР АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАНЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПО РАДИОКАНАЛАМ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Предложен способ адаптивного выбора алгоритмов сжатия и формирования сигнально-кодovых конструкций для оперативной передачи видеоданных с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью. Способ учитывает особенности совместной работы алгоритмов сжатия и канального помехоустойчивого кодирования, а также позволяет учитывать устойчивость сжатых данных к появляющимся ошибкам и сбоям при передаче по радиоканалу. Рассмотрено влияние используемых в канале передачи специальной информации алгоритмов сжатия и формирования сигнально-кодovых конструкций на качество восстановления видеоданных. Представлены результаты имитационного моделирования процесса сжатия и передачи видеоданных с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для различных соотношений сигнал/шум в радиоканале.

Ключевые слова: радиоканал передачи видеоданных, сигнально-кодovая конструкция, алгоритм сжатия видеоданных, дистанционное зондирование Земли.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко используются видеоданные, полученные космическими системами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, для социально-экономического развития страны и ее обороноспособности. Современные космические системы ДЗЗ – сложные функционально взаимосвязанные технические структуры, включающие в свой состав орбитальные и наземные космические средства [1].

Разрабатываемые в настоящее время образцы бортовой аппаратуры сбора и обработки информации для перспективных космических аппаратов (КА) ДЗЗ представляют собой сложные изделия электроники, реализующие современные информационные технологии и развивающиеся в направлении совершенствования высокоразрешающей панхроматической оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), информативность которой напрямую зависит от возможности обеспечения высокого пространственного и радиометрического разрешения, а также в направлении использования методов многоспектральной и гиперспектральной съемки, позволяющей регистрировать излучение в десятках и сотнях узких участков (каналах) диапазонов видимого и инфракрасного спектра [1, 2].

Дальнейшее совершенствование КА ДЗЗ, оснащенных высокоинформативной ОЭА, связано с необходимостью разрешения ряда объективных противоречий, сдерживающих их развитие. В настоящее время на первый план выходит противоречие между большими объемами получаемых бортовой ОЭА КА ДЗЗ видеоданных (до единиц Тбайт в сутки) и ограниченной пропускной способностью существующих радиоканалов передачи информации на наземные приемные пункты информации (НППИ) [3, 4].

Задача согласования информационной производительности современной ОЭА наблюдения и пропускной способности радиоканалов передачи видеоданных с КА ДЗЗ решается за счет применения различных алгоритмов сжатия (компрессии) видеоданных, снижающих объемы передаваемых видеоданных, а также различных сигнально-кодovых конструкций (СКК), реализуемых

на этапе канального кодирования данных, при их передаче по радиоканалу, позволяющих обеспечить высокую скорость передачи. С одной стороны, используемые алгоритмы компрессии не учитывают влияние сжатых видеоданных появляющихся ошибок и сбоев при передаче по радиоканалу, а алгоритмы помехоустойчивого кодирования – особенности сжатия видеоданных [5, 6].

Более того, при сжатии видеоданных и канальном кодировании влияние необнаруженных и неисправленных ошибок и сбоев при различных условиях приводит к несущественным искажениям или частичной (полной) потере видеоданных.

В статье предложен способ адаптивного выбора параметров алгоритмов сжатия и формирования СКК, учитывающий изменения качества видеоданных ДЗЗ при передаче по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОКАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАННЫХ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Основными факторами, определяющими пропускную способность радиоканала передачи данных, являются ширина полосы пропускания канала W и отношение сигнал/шум. Отношение сигнал/шум тесно связано с энергетическим бюджетом радиоканала между КА ДЗЗ и наземной приемной системой. Бюджет радиоканала передачи видеоданных с КА ДЗЗ осуществляется по известной методике [7].

Достижение высоких значений эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ) бортовой передающей аппаратуры КА ДЗЗ является одной из самых сложных задач, связанной с ограниченными энергетическими возможностями КА ДЗЗ, особенно малых КА, и сложностями в создании и эксплуатации бортовых передающих антенн КА ДЗЗ с высоким коэффициентом усиления $G_{\text{прд}}$. Мощность передатчика большинства современных КА ДЗЗ, как правило, не превышает 10 Вт, а коэффициенты усиления бортовых антенн не превышают 6 дБ и величина ЭИИМ, соответственно, ограничивается величиной порядка 16–20 дБВт. Увеличение ЭИИМ бортовой аппаратуры КА ДЗЗ может быть обеспечено за счет использования направленных антенн, оборудованных опорно-поворотным устройством с управлением по азимуту и углу места. Коэффициенты усиления таких бортовых антенн могут достигать 20–40 дБ, что позволяет обеспечить ЭИИМ до 40 дБВт. Недостатком таких антенн является их дороговизна и сложность в эксплуатации, что позволяет размещать их в основном на больших КА ДЗЗ [1, 7].

Требуемое отношение сигнал/шум на входе приемного устройства $q_{\text{треб}}$, является показателем качества приема сигнала и определяется вероятностью ошибки передачи бита информации P_B [9]. В условиях воздействия белого гауссовского шума при цифровой передаче данных принято рассматривать P_B как зависимость от отношения энергии сигнала E_b , приходящейся на один бит, к спектральной плотности мощности аддитивного белого гауссовского шума N_0 . Параметр E_b/N_0 связан с параметром $q=P_S/P_N$ следующим соотношением: $E_b/N_0 = P_S/P_N (W/R)$, где E_b – энергия бита информации, N_0 – спектральная плотность мощности шума. Таким образом в цифровых системах связи параметр E_b/N_0 представляет собой отношение P_S/P_N нормированное на ширину полосы W и скорость передачи битов информации $R=1/\tau_b$, где τ_b – время передачи бита информации. Чем меньше требуемое для системы связи отношение E_b/N_0 , тем эффективнее процесс детектирования сигнала при заданной вероятности ошибки и выше пропускная способность радиоканала. К современным космическим системам ДЗЗ предъявляются высокие требования по обеспечению достоверности передачи информации $P_B=10^{-6}$ – 10^{-9} . Поэтому для достижения высоких значений пропускной способности радиоканала необходимо обеспечивать максимально возможное пороговое от-

ношение сигнал/шум, при котором возможна синхронизация между передающей и приемной аппаратурой.

Стремление к увеличению скорости передачи в радиоканале R наталкивается на ряд проблем, связанных с необходимостью одновременной минимизации вероятности битовой ошибки P_B , максимизацией отношения E_b/N_0 и ширины полосы частот W , что невозможно.

Современные космические системы ДЗЗ, функционируют в условиях ограниченной полосы частот W (375–400 МГц) и классическим способом решения задачи по повышению скорости передачи информации в радиоканале является использование СКК с M -арной передачей сигналов. Для M -арных кодов τ_b можно выразить через скорость передачи информации R и относительную скорость кода r : $\tau_b = (r \log_2 M)/R$. В этом случае с учетом выбранного вида модуляции в канале полоса пропускания приемника до детектора определяется как $W = 1,1R/(r \log_2 M)$, где M – количество символов в алфавите.

Известно [4-7], что виды манипуляции с малым значением M , например, $BPSK$, $QPSK$ или $8PSK$, характеризуются наилучшими показателями помехоустойчивости. С другой стороны, системы передачи, использующие такие виды модуляции, обеспечивают наименьшую из возможных скоростей передачи информации. С ростом M , при использовании таких видов модуляции как, например, квадратурная амплитудная модуляция $16-QAM$ или $64-QAM$, происходит обмен энергетических показателей эффективности на частотные, и скорость, соответственно, в 4 и 6 раз выше по сравнению с модуляцией $BPSK$. Однако при этом за увеличение скорости приводит к повышению требовательности к качеству радиоканала передачи информации.

Поскольку использование M -арной передачи сигналов при прочих равных условиях более требовательно к помехоустойчивости радиоканала передачи данных, то повышение запаса энергетического бюджета радиоканала, а соответственно и возможностей по обеспечению более высоких значений скоростей передачи информации в радиоканале, возможно за счет применения различных методов помехоустойчивого кодирования. Эффективность помехоустойчивого кодирования принято оценивать величиной энергетического выигрыша от кодирования (ЭВК) определяемого уровнем снижения отношения E_b/N_0 в случае использования помехоустойчивого кодирования по сравнению со случаем, когда передача осуществляется без кодирования. Наличие ЭВК соответствует эффекту увеличения мощности передатчика, пересчитанной на одинаковые скорости передачи информации в радиоканале.

К наиболее эффективным методам обеспечения высокого уровня достоверности передачи информации в радиоканале можно отнести алгоритмы сверточного кодирования, коды Рида-Соломона, каскадные схемы кодирования, алгоритмы турбо-кодов [6, 7]. Для современных высокоэффективных кодеков при условии обеспечения достоверности передачи информации в канале $P_B=10^{-6}$ величина ЭВК составляет порядка 6–11 дБ. Например, известный алгоритм сверточного кодирования для стандартного кода с кодовой скоростью $r=1/2$ и длиной стандартного кодирующего регистра $k=7$ позволяет достичь ЭВК в 5 дБ. Граница Шеннона для пропускной способности канала показывает, что для кодовой скорости $r=1/2$ и $P_B=10^{-6}$ ЭВК может быть более 9 дБ [4, 7]. Применение помехоустойчивого кодирования позволяет получить энергетический выигрыш до 6 дБ (что эквивалентно уменьшению диаметра рефлектора наземной зеркальной приемной антенны до двух раз).

Расчеты показывают, что при условии обеспечения достоверности передачи информации не хуже $P_B=10^{-6}$ ЭИИМ бортовой передающей аппаратуры КА порядка $E_{\text{треб}}=35$ дБ и использовании наземных зеркальных приемных антенн диаметром зеркала порядка $D=9$ м возможно добиться скорости передачи информации в радиоканале до 1 Гбит/с [4]. Реализованные в настоящее время радиолинии позволяют обеспечить скорость передачи информации в радиоканале до 300 Мбит/с на одной несущей, однако в ближайшей перспективе планируется создание серии унифицированных радиолиний со скоростями 300, 450 и 600 Мбит/с.

Таким образом, общая формулировка задачи повышения скорости передачи видеоданных ДЗЗ в радиоканале может быть представлена следующим образом [5, 6].

Дано: некоторое заданное множество возможных методов M -арной манипуляции в радиоканале $\{M\}$; задана требуемая вероятность ошибочной передачи бита информации P_B в радиоканале.

Вводимые ограничения: фиксированное для заданного диапазона рабочих длин волн передающей системы значение полосы частот $W_{\text{доп}}$; заданное значение отношения сигнал/шум на входе приемника $q_{\text{max}} = (P_S / P_N)_{\text{вх}}$.

Необходимо найти: СКК, позволяющую обеспечить необходимую скорость передачи в радиоканале с учетом имеющихся ограничений.

Показатель скорости при этом может быть представлен функцией вида

$$R = f(W(K_1), \{M\}, q(K_2)) \rightarrow \max \quad (1)$$

где

K_1	–	коэффициент эффективности использования полосы частот;
K_2	–	коэффициент эффективности мощности передатчика, характеризующий эффективность вида модуляции (1/сВт);
$W(K_1) \leq W_{\text{доп}}(K_1)$	–	полоса частот;
$M \in (PSK, FSK, QAM, \dots)$	–	множество типов модуляций сигнала;
$q(K_2) \leq q_{\text{max}}(K_2)$	–	отношение сигнал/шум на входе приемника.

Поскольку ресурсными параметрами, определяющими ограничения, в данном функционале являются W и мощность передающего устройства $P_{\text{прд}}$, то показатель R можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} R(K_1, K_2) = K_1 W + K_2 q \\ W(K_1) \leq W_{\text{доп}}(K_1) \\ q(K_2) \leq q_{\text{max}}(K_2) \end{cases} \quad (2)$$

Совершенствование радиоканала передачи видеоданных ДЗЗ связано с разработкой и внедрением новых СКК, позволяющих повысить скорость в радиоканале на одной несущей частоте при требуемой P_B в радиоканале.

В качестве перспективного задела к настоящему времени созданы опытные образцы сверхскоростных передающих устройств X -диапазона со скоростями до 1 Гбит/с достигаемыми с использованием модуляции 8-PSK и 16-APSK, обеспечивающими повышение пропускной способности в 3 раза и увеличение энергетического выигрыша на 5–6 дБ [4, 6].

В то же время, даже в случае ожидаемого увеличения скорости передачи, только прямая передача данных не позволит обеспечить приём всего потенциального объема информации с КА ДЗЗ нового поколения, производительность которых может в 3–5 раз превысить пропускную способность радиоканалов передачи данных на НППИ.

АДАПТИВНЫЙ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАДИОКАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАНЫХ

Цифровое изображение, зарегистрированное ОЭА КА ДЗЗ, формируется путем построчного сканирования напряжения ПЗС-линеек оптических датчиков, которое представляется в виде многомерной матрицы

$$\mathbf{L}_m = \begin{bmatrix} L_{11m} & \dots & L_{1Ym} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{X1m} & \dots & L_{XYm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

где L_{xym} – регистрируемые отсчеты яркости наблюдаемой сцены;
 X, Y – число пикселей матричного фотоприемника по осям прямоугольной системы координат;
 m – номер спектрального канала ОЭА.

Цифровое изображение каждого m -го спектрального канала ОЭА для снижения информационной избыточности независимо друг от друга подвергается компрессии с помощью алгоритма сжатия. При этом компрессия осуществляется с заданной степенью сжатия $K_{сж}$ [8].

Существует несколько подходов к сжатию информации – с потерями и без потерь. В современных системах сжатия изображений КА ДЗЗ применяются алгоритмы сжатия с потерей информации, так как они позволяют достичь более высоких значений $K_{сж}$. В основе алгоритмов лежат методы предиктивного кодирования и методы трансформационного кодирования (кодирования с преобразованием).

При сжатии методами предиктивного кодирования, например, дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ), передаче подлежит только та составляющая сигнала, которую невозможно предсказать (сигнал ошибки предсказания) и которая, следовательно, несет информацию. Такой подход не позволяет обеспечить больших коэффициентов сжатия изображений [8].

На практике для сжатия изображений ДЗЗ наиболее широко применяются методы трансформационного кодирования (блочное кодирование с преобразованием изображения) основанные на идее кодирования не отсчетов непосредственно изображения, а отсчетов его двухмерного преобразования, например, дискретного косинусного преобразования Фурье (ДКП). Сжатие изображений на основе ДКП обладает рядом преимуществ:

- симметричность операций ДКП и обратного ДКП по времени;
- низкая структурная и вычислительная сложность алгоритма;
- высокий коэффициент сжатия;
- возможность работы с 8, 12, 24-битными изображениями для реализации на борту КА ДЗЗ;
- постоянная скорость формирования сжатого массива видеоданных, что позволяет использовать его в системах реального времени. Основным недостатком наличие характерных искажений [8].

Методы кодирования изображений основаны на разбиении изображения на блоки для дальнейших математических операций (например, ДКП, квантование, кодирование длин серий). Квантование каждого пикселя изображения одновременно увеличивает коэффициент сжатия и приводит к снижению качества восстановленных изображений [8]. Негативный эффект попиксельного квантования приводит к появлению так называемой «блочности» на восстановленном изображении и является наиболее заметным при высоких коэффициентах сжатия $K_{сж}$ видеоданных как это показано на рис. 1.

На качество принятых видеоданных оказывают влияние не только степень сжатия, но и параметры алгоритмов формирования СКК, а именно методы помехоустойчивого кодирования и структура транспортных кадров, используемых в системах передачи видеоданных. С использованием запрограммированных в среде моделирования LAbVIEW алгоритмов сжатия и формирования СКК видеоданных был разработан программный комплекс для исследования влияния выбора сигнально-кодовых конструкций и алгоритмов сжатия видеоданных ДЗЗ на достоверность передачи по радиоканалам информационного обмена с КА.



а)



б)

Рис. 1. Негативный эффект попиксельного квантования изображения:

а – исходное изображение; б – изображение, сжатое алгоритмом JPEG ($K_{сж}=10$)

Выбор и настройка алгоритма компрессии видеоданных в программном комплексе осуществляется по критерию коэффициент сжатия ($K_{сж}$) – качество видеоданных после декомпрессии. $K_{сж}$ выбирается таким, чтобы обеспечить минимальные потери качества видеоданных при их декомпрессии. Однако, уровень компрессии видеоданных определяемый $K_{сж}$ (бит/пиксель) как правило ограничен характеристиками пропускной способности радиоканала передачи видеоданных с учетом появления дополнительной избыточности сжатого информационного массива из-за применения алгоритма помехоустойчивого кодирования.

С точки зрения помехоустойчивого кодирования, передаваемые сжатые видеоданные делятся на блоки длиной k бит для дальнейшей передачи по радиоканалу, каждый из которых подвергается помехоустойчивому кодированию, что влечет увеличение размера каждого блока в целом и объема передаваемого информационного массива соответственно.

В общем виде применение алгоритма помехоустойчивого кодирования $A_{errcode}$ для обнаружения и исправления ошибок и сбоев приводит к необходимости решать параллельно с оптимизационной задачей (2) задачу оптимизации вида [10].

$$\begin{cases} P(Q(A_{errcode}) = 0) \leq P_{\text{бл. треб}} \\ \eta(A_{errcode}) \rightarrow \min \end{cases}, \quad (4)$$

где $P(Q(A_{errcode}) = 0)$ – достоверность переданной информации, определяемая как вероятность безошибочного декодирования блока без потерь данных;

$P_{\text{бл. треб}}$ – требуемая достоверность передачи блока информации;

$\eta = n/k$ – избыточность помехоустойчивого кода.

Сжатый и кодированный помехоустойчивым кодом информационный массив делится на транспортные кадры, для последующей пакетной передачи. Транспортный кадр представляет собой, как правило, совокупность информационной и служебной части фиксированного объема бит. Информационная часть транспортного кадра предназначена для хранения и передачи целевой информации, т.е. части информационного массива определенной длины бит. Служебная часть транспортного кадра предназначена для хранения и передачи информации о времени начала и окончания передачи, проверочных битах помехоустойчивого кода, номера переданного и следующего информационного пакета и т.п.

В общем виде оптимизационная задача настройки алгоритма сжатия $A_{сж}$ видеоданных может быть представлена в виде

$$\begin{cases} K_{сж}(A_{сж}) \leq K_{сж. \text{ треб}} \\ Q(A_{сж}) \rightarrow \min \end{cases}, \quad (5)$$

где $Q(A_{сж})$ – достоверность восстановленных видеоданных;

$K_{сж. \text{ треб}}$ – требуемый коэффициент сжатия, обеспечивающий минимальные потери качества видеоданных.

Особенностью передачи сжатых видеоданных ДЗЗ по радиоканалу является наличие сбоев и неисправляемых ошибок в данных, возникающих вследствие воздействия помех. Сбои и ошибки проявляются в виде инвертирования бит данных. В предположении, что сбои происходят независимо друг от друга и, что известна вероятность сбоя передачи одного бита P_B , вероятность возникновения события S_i появления i сбоев в массиве сжатой информации составляет $P(S_i) = C_n^i P_B^i (1 - P_B)^{n-i}$. Вероятность возникновения ошибки в передаваемом блоке транспортного кадра составляет $P(\bar{S}_0) = 1 - P(S_0) = 1 - (1 - P_B)^n$, при значениях $P_B > 10^{-7}$ она становится неприемлемо большой и может привести к серьезной потере информации.

Пример проявления сбоев и ошибок при передаче видеоданных ДЗЗ, обусловленных применением алгоритмов сжатия и блочного помехоустойчивого кодирования при передаче по ненадежному радиоканалу представлен на рис. 2.

Раздельный выбор и настройка алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования видеоданных приводит к выбору алгоритмов помехоустойчивого кодирования с высокой степенью избыточности $\eta = n/k$, что позволяет исключить потерю информации из-за сбоев и ошибок, а также к выбору алгоритмов сжатия с максимально-возможным значением коэффициента сжатия $K_{сж}$ при минимальной разнице в качестве исходных и восстановленных видеоданных.

Более рациональным является совместный выбор и настройка алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования. В данном случае комплексная постановка оптимизационной задачи может иметь вид

$$\begin{cases} K_{сж}(A_{сж})\eta(A_{errcode}) \leq K_{сж. \text{ треб}} \\ P(Q(A_{сж}) + Q(A_{errcode}) \leq Q_{\text{треб}}) \leq P_{\text{треб}}, \\ Q_{\text{треб}} \rightarrow \min \end{cases} \quad (6)$$

где $K_{сж. \text{ треб}}$ — требуемая степень сжатия;
 $P_{\text{треб}}$ — достоверность передачи всего кадра;
 $Q_{\text{треб}}$ — суммарные потери качества восстановленного кадра вследствие применения алгоритма сжатия и помехоустойчивого кодирования (при условии, что искажения, возникающие вследствие сжатия и кодирования, независимые).

Для сокращения избыточности видеоданных с использованием сжатия с потерями необходимо определить максимально-возможный коэффициент сжатия $K_{сж. \text{ треб}}$, а также значения метрик качества восстановленного изображения.

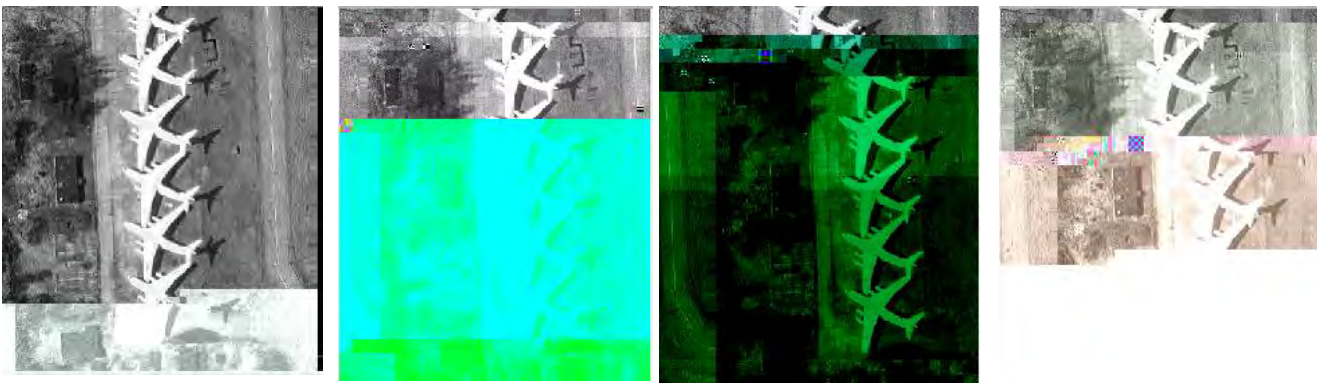


Рис. 2. Характер искажений принятого изображения при передаче по ненадежному радиоканалу

При выборе коэффициента сжатия $K_{сж.}$ треб. целесообразно учитывать разницу в качестве исходных и восстановленных видеоданных. Оценку качества сжатых видеоданных можно произвести с использованием стандартных метрик:

– число ошибок между исходным и декомпрессионным изображениями, т.е. разницей значений яркости соответствующих пикселей (количество не нулевых элементов матрицы)

$$\Delta = L_{[x,y]} - \overline{L_{[x,y]}} ,$$

где $\overline{L_{[x,y]}}$ – матрица значений яркости пикселей исходного изображения;

$L_{[x,y]}$ – матрица значений яркости пикселей восстановленного изображения;

– среднеквадратическое отклонение яркости пикселей исходного и восстановленного изображения

$$\sigma = \frac{1}{xy} \sqrt{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y (L_{xy} - \overline{L_{xy}})^2} ;$$

– коэффициент корреляции исходного L_x и L_y восстановленного изображений

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (L_{xi} - \overline{L_{xi}})(L_{yi} - \overline{L_{yi}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (L_{xi} - \overline{L_{xi}})^2 \sum_{i=1}^m (L_{yi} - \overline{L_{yi}})^2}} .$$

Для учета изменения качества восстановленных видеоданных проведены операции сжатия и декомпрессии видеоданных с различными коэффициентами сжатия, при этом фиксировались изменения метрики качества. Эмпирическим методом определены границы сжатия видеоданных, то есть появление таких эффектов, как «блочность» и резкие перепады яркости на границах блоков для алгоритмов на основе ДКП ($r_{xy}=0,96$ и $\sigma=16$). На рис. 3 приведены примеры исходного и восстановленного изображений, а также граф первой строки каждого изображения после операции сжатия алгоритмом JPEG (на основе ДКП) при появлении характерных искажений в восстановленном изображении.

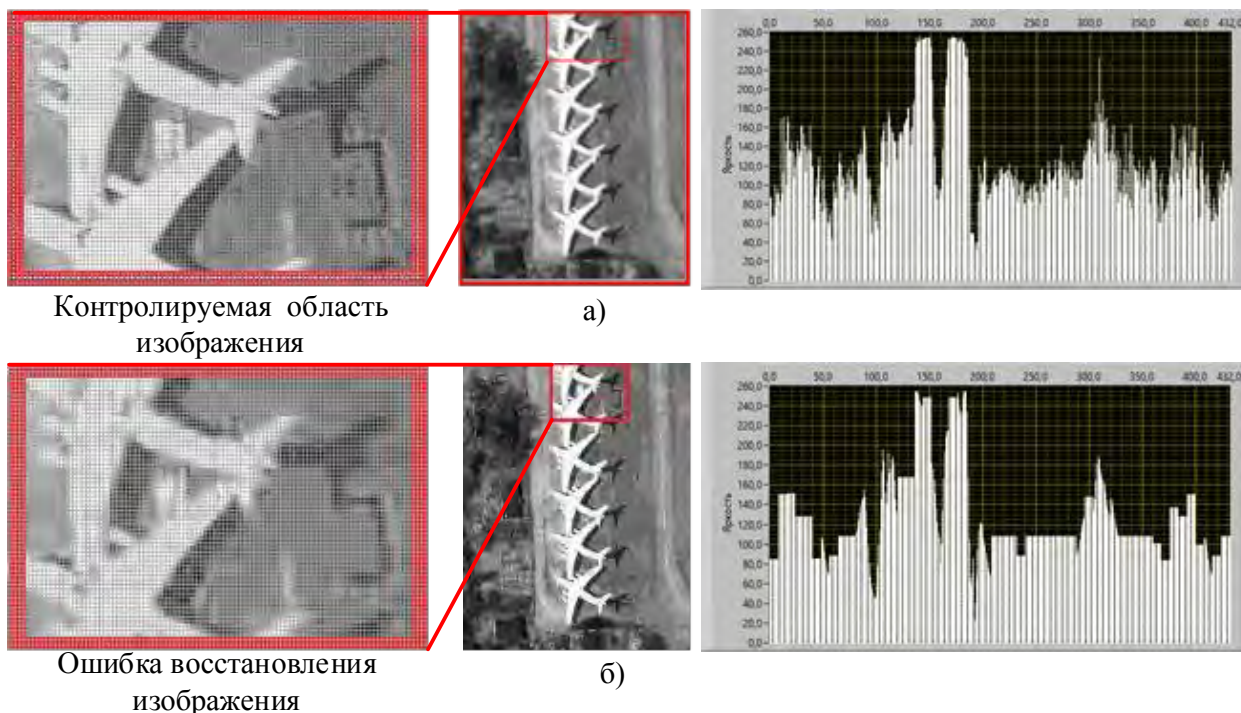


Рис. 3. Характер искажений при восстановлении изображения, сжатого алгоритмом JPEG:

а – исходное (несжатое) изображение и граф 1-й строки; б – сжатое восстановленное изображение, формат 4:4:4, и граф 1-й строки

Для дополнительной оценки качества принятого и восстановленного изображения кроме вышеописанных метрик качества изображений, может быть использован такой параметр, как процент потери информации в изображении:

$$E_{\%} = \frac{V_{xy} - (L_{[xy]} - \overline{L_{[xy]}}) \cdot V_{pix}}{V_{xy}} = \frac{V_{xy} - \Delta \cdot V_{pix}}{V_{xy}} = 1 - \frac{\Delta \cdot V_{pix}}{V_{xy}},$$

где V_{xy} – объем изображения в битах;

V_{pix} – размер пикселя изображения в битах.

Сбои в принятых сжатых видеоданных приводят к различному значению показателей качества восстановленных видеоданных. Применительно к сжатой видеоинформации снижение качества (увеличение количества ошибок при приеме и восстановлении изображения) приводит к заметным перепадам значения яркости части изображения, а в худшем случае соответствует появлению абсолютно черных или белых полос на восстановленном изображении, как это показано на рис. 2.

Разница в качестве сжатого и принятого восстановленного изображений является следствием влияния таких негативных эффектов как:

- появление ошибок в процессе преобразования передаваемого сообщения в бинарный радиосигнал при технической реализации устройства;
- несовершенство методов приема и передачи радиосигналов и их технической реализации;
- несовершенство методов декодирования принятых транспортных кадров;
- особенности распространения сигнала в радиоканале;
- низкая помехозащищенность радиоканала передачи (влияние помех различного происхождения);
- несовершенство структуры транспортного кадра, используемого при пакетной передаче видеоданных.

При пакетной передаче видеоданных ДЗЗ в параметрах транспортных кадров учитывают только объем информационной и служебной части транспортного кадра. Искажение служебной части транспортного кадра приводит к повторной передаче этого кадра. Служебная часть транспортного кадра не содержит информации о значениях яркости и контрастности изображения и оценить качество сжатого изображения возможно только после его восстановления на приемной стороне. Внесение в служебную часть транспортного кадра значений характеристик кодируемого блока изображения позволит на этапе его дешифровки (сравнение характеристик блока изображения с контрольной информацией, содержащейся в служебной части транспортного кадра) определить искаженные транспортные кадры и организовать повтор передачи только искаженного транспортного кадра, что в конечном итоге повысит оперативность поступления и дешифровки видеоданных с КА ДЗЗ и их достоверность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты показывают, что разработка настройки функционирования перспективных космических систем ДЗЗ должна вестись с учетом оценок информационной производительности ОЭА ДЗЗ, пропускной способности радиоканалов передачи, алгоритмов сжатия и формирования СКК для передачи видеоданных на НППИ. Согласование избыточности помехоустойчивого кодирования и значение коэффициента сжатия видеоданных требуют обеспечить минимальную разницу в качестве исходных зарегистрированных и принятых восстановленных видеоданных. Учитывая особенности пакетной передачи видеоданных ДЗЗ служебную часть передаваемого транспортного кадра необходимо дополнить информацией

о кодируемом и сжимаемом блоке изображения и кодировать отдельно от информационного блока пакета, что позволит повысить помехоустойчивость передачи видеоданных в целом.

Адаптивный выбор параметров алгоритмов сжатия и формирования СКК при передаче видеоданных КА ДЗЗ по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью позволяет повысить достоверность и оперативность передачи видеоданных на НППИ на 6–18 %.

Список используемых источников

1. *Бакланов А.И.* Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5, вып. 3. – С. 17–28.
2. *Мальцев Г.Н., Козинев И.А.* Передача гиперспектральных видеоданных дистанционного зондирования Земли по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью // Информационно-управляющие системы. – 2016. – Т. 81, № 2. – С. 74–83.
3. *Архипов С.А.* Исследование требований к перспективной оптико-электронной аппаратуре для малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. – 2018. – № 1. – С. 155–162.
4. Особенности расчета и проектирования высокоскоростных радиолиний космических аппаратов ДЗЗ / А.Н. Ершов, В.В. Березкин, С.В. Петров и др. // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Вып. 3, т. 5. – С. 52–57.
5. *Сойфер В.А.* Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли: монография. – Самара: Новая техника, 2015. – 256 с.
6. *Козинев И.А., Леошко А.А., Гарагуля А.С.* Комплексная постановка задачи повышения скорости передачи видеоданных с учетом сжатия и помехоустойчивого кодирования // Сборник трудов 73 Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио 20–28 апреля 2018 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С. 24–25.
7. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2016. – 1104 с.
8. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юркин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.

В.И. Кузнецов,
доктор техн. наук

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АВТОНОМНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ВЗАИМНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПУЛЬСАРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В теории автономной навигации и ориентации при орбитальном движении вокруг Земли пока не рассматривалась полностью задача самоопределения движения КА. Здесь под самоопределением движения понимается способность КА автономно, без связи с какой-либо другой системой или устройством, на основе бортовых измерений и обработки их бортовым компьютером определить: орбиту центра масс аппарата, ориентацию его корпуса в трехмерном пространстве, текущее время в заданной временной шкале.

В настоящее время наиболее подробно в моделях исследуются первые две проблемы, третья проблема в автономной постановке совместно с первыми двумя до сих пор не рассматривалась. Ныне она решается с помощью наземного комплекса управления. В статье рассматривается возможность совместного решения всех упомянутых проблем на борту КА.

Ключевые слова: автономность КА, самоопределение движения КА, автономная навигация и ориентация, пульсарная навигация, наблюдаемость системы, фазовый анализ, кросс-корреляция.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду большой сложности и требуемой высокой точности решения задач самоопределения движения КА в объеме, представленном в данной работе, до настоящего времени практически всегда все три проблемы рассматривались отдельно. При этом задачи навигации и ориентации решались в условиях идеального осуществления на борту требуемых шкал времени, задачи автономной навигации и ориентации выполнялись, как правило, на основе различных измеряемых параметров.

В настоящее время задачи построения временной шкалы на борту КА решаются с помощью наземного комплекса управления.

В последнее время удалось объединить решение задач навигации и ориентации для условий орбитального полета при достаточно грубой стабилизации строительных осей КА в текущей орбитальной системе координат (максимальная погрешность каждой оси до 15°). Объединение оказалось возможным при проведении одностипных измерений координат и светимости звезд, распознавания их и расчете виртуальных зенитных расстояний этих звезд с использованием минимум трех оптико-электронных приборах (ОЭП) [1–5]. При этом два ОЭП помещаются в кардановые подвесы для наведения на наиболее яркие звезды, которые бы одновременно являлись оптимально расположенными относительно плоскости опорной орбиты. Третий ОЭП жестко закреплен на корпусе, по измерениям в нем приборных координат звезд и их светимости, с использованием данных об элементах орбиты, решается задача ориентации корпуса КА в трехмерном пространстве. Во всех ОЭП попавшие звезды распознаются.

Разработанный метод автономной навигации и ориентации назван методом по виртуальным измерениям зенитных расстояний звезд [6–9].

Статистическое моделирование показало, что информация первых двух ОЭП позволяет достичь среднеквадратическую погрешность определения любой орбиты менее 1 м по положению и 0,01 мм/с по скорости при соответствующих погрешностях ОЭП порядка 0,01 угловой секунды. Средняя квадратическая погрешность систем ориентации может достигать единиц–десятков угловых секунд при погрешности третьей ОЭП в 0,1 угловой секунды.

Однако необходимо еще раз подчеркнуть, что решения задач автономной навигации и ориентации без оценки фактической точности бортовой шкалы времени представляются лишь этапным подходом к полному решению проблемы автономности КА.

В модели должна быть отражена на основе детального рассмотрения процессов решения всех задач их принципиальная взаимозависимость, и построен общий взаимоуточняющий алгоритм. По сути, речь идет о надлежащем использовании сигналов пульсаров.

Столь высокая точность решения задач ориентации и навигации позволяет представить, что эти задачи становятся ведущими элементами настройки всей системы, будирующими к дальнейшему повышению точности шкалы времени. С другой стороны, растущая точность определения моментов прихода импульсов создаст возможность использования сигналов пульсаров в навигационных целях, как это поясняется в дальнейшем.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МИЛЛИСЕКУНДНЫХ ПУЛЬСАРОВ

Пульсары были обнаружены случайно в 1967 г. при подготовке программы исследований межпланетных мерцаний. Ныне считается установленным фактом, что пульсар – это вращающаяся нейтронная звезда, обладающая очень большими магнитным и электрическим полями и огромной плотностью вещества. Эти продукты конца эволюции звезды излучают во всем спектре электромагнитной энергии в определенном направлении, связанном с осью их вращения [10].

При требуемой высокой точности синхронизации временных шкал КА целесообразно наблюдать наиболее быстровращающиеся, так называемые миллисекундные пульсары [12].

Наблюдательные факты свидетельствуют, что индивидуальные импульсы пульсаров могут значительно отличаться по амплитуде и форме, имея сложную микроструктуру. Однако сразу было замечено, что следование индивидуальных импульсов весьма стабильно во времени.

Так, первый открытый в СССР пульсар B1919+21 излучал регулярные радиоимпульсы с довольно стабильным периодом $P = 1,337$ с (рис. 1) [10].

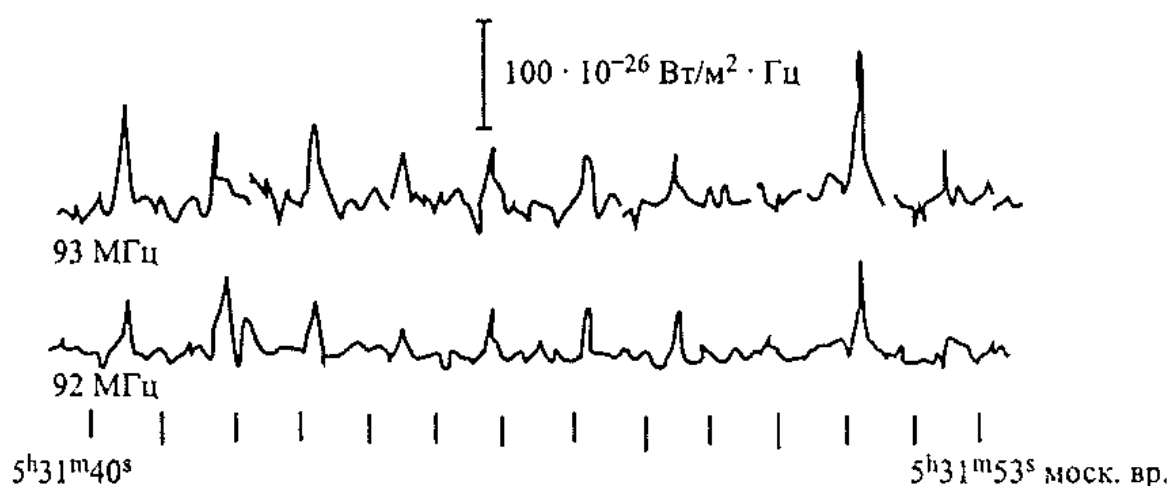


Рис.1. Индивидуальные импульсы пульсара B1919+21

После усреднения примерно нескольких тысяч таких импульсов формируется средний импульс, профиль которого остается неизменным при последующих усреднениях и является своего рода визитной карточкой данного пульсара. Средний профиль может быть простым (однокомпонентным) или многокомпонентным. Кроме устойчивости профиля для среднего

импульса характерна устойчивая линейная поляризация. Кривые изменения ее параметров (степень поляризации, позиционный угол) вдоль среднего импульса не только устойчивы по времени, но и специфичны для каждого пульсара, поэтому они наряду с формой среднего импульса представляют данный пульсар. У некоторых пульсаров степень поляризации может достигать до 100%. При этом позиционный угол, как правило, изменяется монотонно. Спектр среднего импульса также устойчив в области изменения радиочастот на несколько порядков. Подчеркнем, что уже в первых наблюдениях установлено, что спектр излучения пульсаров имеет степенную форму ($\nu^{-\alpha}$), где спектральный индекс находится в пределах $\alpha = 0,6 - 2,9$. Причем, характерное свойство спектров среднего импульса заключается в наличии максимума симметричной формы, корреляция крутизны спектра до и после максимума на не слишком удаленных от максимума частотах одинакова. Процесс формирования среднего импульса пульсара наглядно демонстрирует рис. 2 [11].

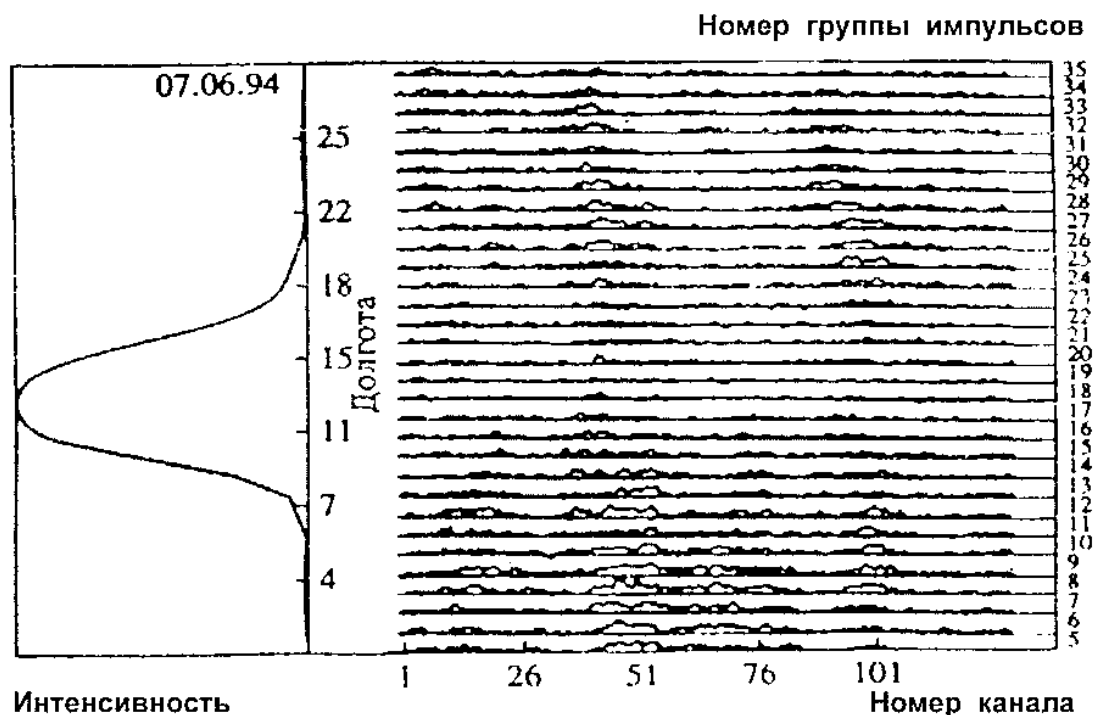


Рис.2. Формирование среднего импульса

Момент максимума среднего импульса оценивается на основе кросс-корреляции данного среднего импульса с эталонным так, как это предложено в [12]. В этой работе произведен отбор кандидатов для построения пульсарной шкалы времени и выбран пульсар В1937+214. Параметры пульсара, приводимые в различных источниках, несколько отличаются. Здесь приведем значения основных параметров на эпоху 1950.0 [12]: период следования импульсов $P = 0,0015578064488724 \pm 2 \text{ с}$, $\dot{P} = (1,05110 \pm 0,00008) \cdot 10^{-19} \text{ с / с}$, $P = 0 - 19$, эпоха в барицентре в юлианской шкале JD 2445303,2731658, геоцентрические координаты пульсара в эпоху 1950.0 $\alpha = 19^{\text{h}}37^{\text{m}}28,74600^{\text{s}} \pm 3$, $\delta = 21,28014606^{\circ}$, дальность до пульсара $3,60 \pm 1,44 \text{ кпс}$, спектральный индекс в диапазоне 26,3–1415 МГц равен $\alpha = 2,3 \pm 0,144$. Пульсар излучает и в рентгеновском диапазоне, где плотность потока энергии 2–10 Кэв составляет $(3,70 \pm 0,4) \cdot 10^{-13} \text{ эрг / (с} \cdot \text{см}^2)$, светимость $10^{32,73} \text{ эрг / с}$.

Индивидуальные импульсы пульсара В1937+214 представлены на рис. 3 [13].

Энергетическая характеристика излучений пульсара представлена в табл. 1.

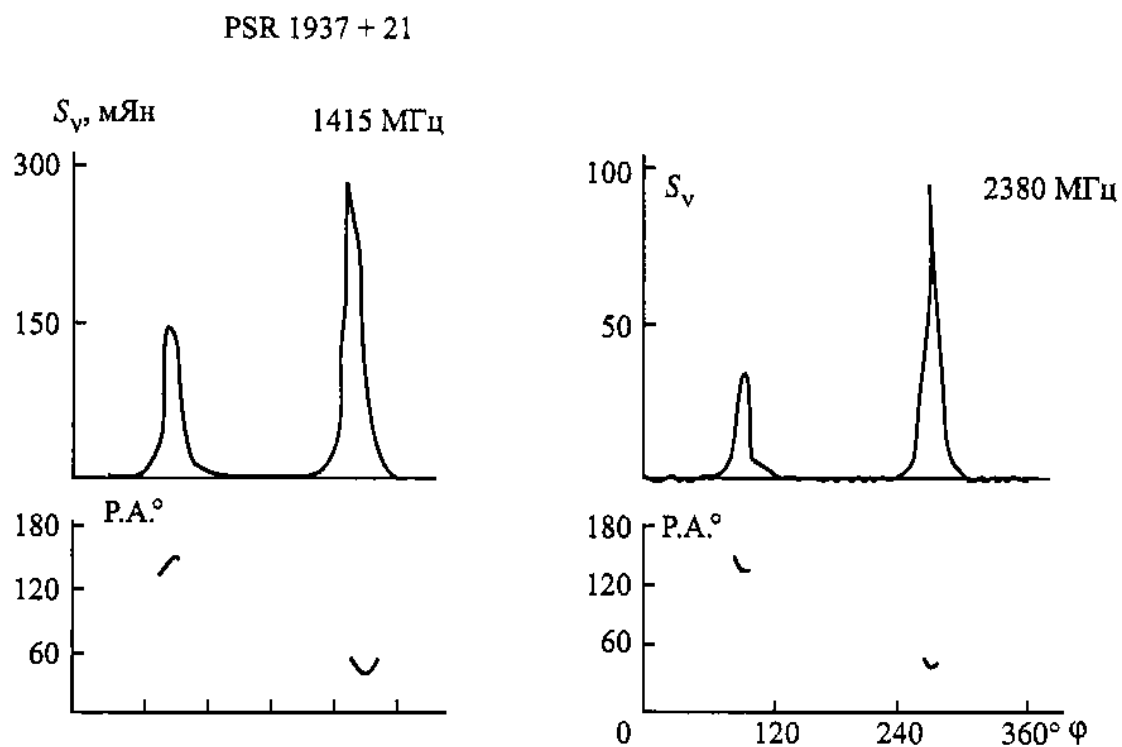


Рис.3. Индивидуальные импульсы пульсара B1937+214

Таблица 1

Энергетическая характеристика излучений пульсара

Частота, ГГц	Плотность потока, мЯн	Ширина импульса, мкс	Уширение импульса из-за рассеяния, мкс
0,2	1850	780	-
0,32	600	160±1090	95
0,4	350	90	-
0,43	300	90±10	25
0,6	130	80	-
0,8	66	70	-
1,0	39	60	-
1,390	18	65±10	0,14
1,4	17	50	-
1,667	11	40±10	0,07
2,3	5	40	-
2,380	5	43±4	0,01

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ПУЛЬСАРА НА БОРТУ КА

Успехи исследований излучений пульсаров дают возможность оценить точность определения остаточного уклонения МПИ в 10 нс [14–16, 24].

Теоретической основой алгоритма высокоточного фазового анализа наблюдений одиночных пульсаров является релятивистская теория астрономических систем координат и шкал времени [16], построение которых осуществляется в рамках общей теории относительности.

В ОТО свойства координатной системы, введенной в некоторой области пространства и времени, и потенциалы гравитационного поля описываются единым объектом – метрическим тензором, который ищется путем решений уравнений Эйнштейна, а четырехмерные координаты в соответствующей системе координат обозначаются $x^a = (Ct, x^i)$, где C – скорость света, t – время, x^i – трехмерные координаты.

В работе [14] приводятся преобразования между барицентрической, геоцентрической системами координат, выводится формула связи пульсарного и барицентрического времени, исследована зависимость наблюдаемой частоты вращения пульсара и ее производных по времени от трансверсальной и радиальной составляющей барицентрической скорости движения пульсара. В работе [15] даются результаты хронометрирования миллисекундных пульсаров в присутствии низкочастотных шумов.

Другими словами, если научная основа построения барицентрической шкалы времени проработана, то в проблеме реализации приема сигналов пульсаров на борту КА есть еще неясности. Прежде всего, насколько нам известно, в настоящее время не решен вопрос о требуемых для приема сигналов пульсара весогабаритных характеристиках соответствующей антенны.

Еще в девяностые годы прошлого столетия в России по проекту международного сотрудничества начато создание многоканального космического радиотелескопа диаметром 10 м, предназначенного для работы в диапазоне частот 327 МГц, 1665, 492 ГГц в составе РСДБ «Земля-Космос» – проект «Радиоастрон» [17, 18].

Очевидно такой КРТ может быть прототипом для хронометрирования пульсаров, ибо его чувствительность предполагается в районе мощности принимаемых сигналов от пульсаров (сотни, единицы мЯн), и рабочий диапазон волн радиоинтерферометра перекрывает диапазон волн, в котором ныне принимаются радио и рентгеновские волны от пульсаров.

По мнению автора статьи, существует еще один способ повышения точности и надежности приема сигналов пульсаров – использование их излучения в рентгене. Это реально именно для расчетов на борту КА. В силу больших энергий рентгеновского диапазона в современной аппаратуре со стопроцентной гарантией регистрируется каждый фотон, регистрирующая аппаратура значительно проще. Счетчик частиц представляет собой плоскую закрытую коробку, наполненную тяжелым инертным газом. Например, фотон с энергией в 100 кэВ будет поглощен в кристалле йодида натрия толщиной всего 0,5 см. Очевидно можно найти зависимость (кросс-корреляцию) при испытаниях в космосе между моментами поглощения фотона определенной энергии и появления радиоимпульса.

ПУЛЬСАРНАЯ НАВИГАЦИЯ

После того как шкалы всех КА системы согласованы по сигналам пульсара в барицентрической системе координат возникает при дальнейшем наблюдении пульсара новая навигационная функция $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ (рис. 4), равная разнице моментов прихода N -го импульса на два КА.

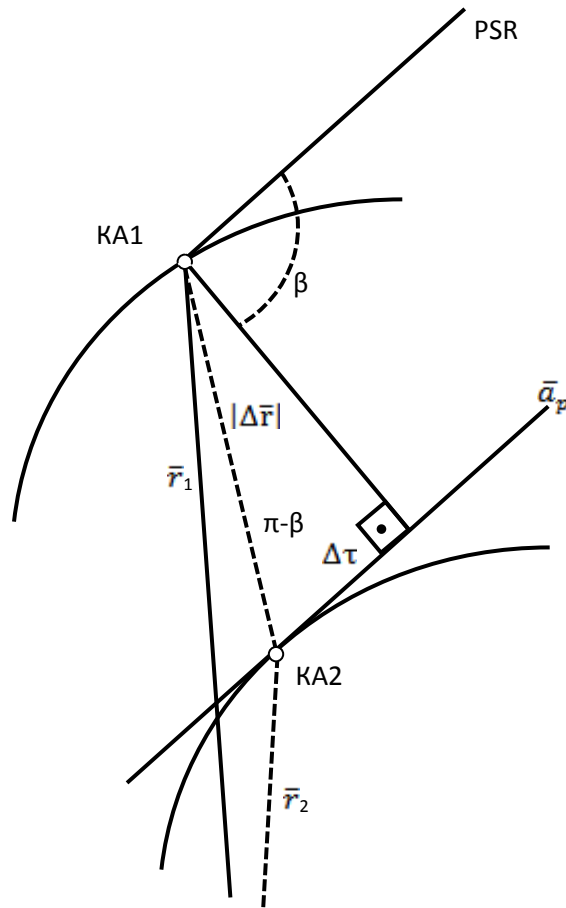


Рис.4. Пульсарная навигация

На рис. 4 обозначены: \vec{a}_p — геоцентрический орт направления на пульсар; \vec{r}_1, \vec{r}_2 — геоцентрические радиус-векторы космических аппаратов КА1 и КА2 соответственно; $\Delta\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$ — вектор относительного положения аппаратов; β — угол между \vec{a}_p и линией визирования КА2 с КА1.

Ввиду практической бесконечности удаления пульсара, с одной стороны,

$$\Delta\tau = \cos(\pi - \beta) \cdot |\Delta\vec{r}| = -\cos\beta \cdot |\Delta\vec{r}| \quad (1)$$

или

$$|\Delta\vec{r}| = -\Delta\tau / \cos\beta, \quad (2)$$

с другой стороны,

$$\Delta\tau = |\Delta\vec{r}| \cdot \vec{a}_p. \quad (3)$$

В этих преобразованиях значение $\Delta\tau$ представлено в единицах длины. Из (2) и (3) следует, во-первых, что измерение Δr по схеме слежения за пульсарами эквивалентно получению неизлучающим способом информации о дальности между аппаратами или угле КА2-пульсар; во-вторых, хотя функции (2) и (3) очевидно зависимы, но с учетом технологии слежения за пульсаром их можно рассчитывать на разных этапах процесса: Δr отнести к моментам прихода каждого индивидуального импульса на аппараты, а $\Delta\tau$ отнести к моментам измерения фаз средних импульсов.

Действительно, если, набирая индивидуальные импульсы можно просто рассчитывать $|\Delta \vec{r}| = f(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$, обмениваясь информацией от автономных систем навигации каждого аппарата с определенной периодичностью, $\Delta \tau$ – непосредственно измерять, а в модели рассчитывать согласно (3), то используя различные функции от векторов состояний аппаратов для различных моментов времени, можно уйти от их зависимости, или уменьшить ее. Следовательно, с помощью данных функций, можно построить еще одну навигационную систему, назвав ее системой пульсарной навигации, если рассчитать местные градиенты частных производных с помощью данных и доказать наблюдаемость системы, получаемой в целом (рис. 5).

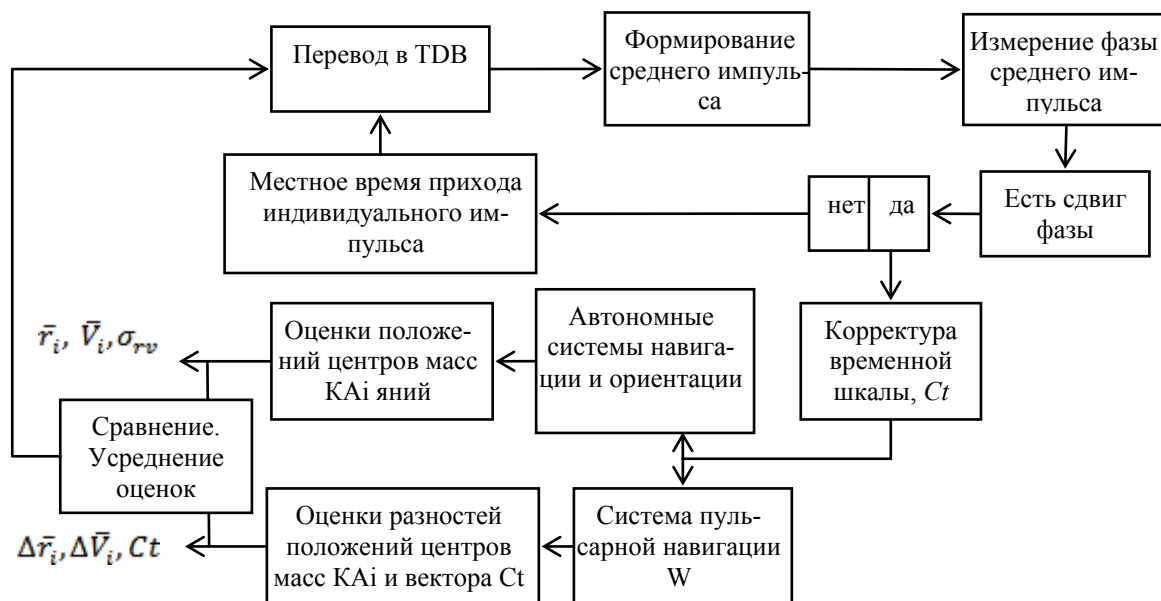


Рис. 5. Иллюстрация метода самоопределения движения КА

В итерационных вычислениях, согласно рис. 5, система пульсарной навигации может оказывать дополнительную регулирующую роль в совместном повышении точности автономных систем навигации каждого КА и точности построения их бортовых шкал барицентрического времени.

Убедиться в этом можно только при полном моделировании всех систем, что является весьма сложной задачей. Однако уже сейчас можно оценить возможность построения такой системы.

Прежде всего, определим наблюдаемость такой системы. Как для любой динамической системы наблюдаемость навигационной задачи решается на основе анализа матрицы Якоби частных производных [19 – 23]. В общем виде матрица запишется

$$J_n = \frac{\partial (G, \dot{G}, \ddot{G}, \dots, G^n)}{\partial (\vec{r}, \vec{V}, \dots, \vec{r}_i, \vec{V}_i)},$$

где G – измеряемая функция;
 i – число уточняемых векторов;
 n – размерность наивысшей потребной производной по времени.

Если $\det J_n \neq 0$, или ранг $J_n = m$, то система считается наблюдаемой, т.е. существует возможность однозначной оценки векторов состояний системы (во втором случае – размерностью m).

Для определения вектора состояния одного аппарата и двух измеряемых функций

$$J_1 = \frac{\partial(G_1, \dot{G}_1, \ddot{G}_1, G_2, \dot{G}_2, \ddot{G}_2)}{\partial(\bar{r}_1, \bar{V}_1)}, \quad (4)$$

соответственно якобиан (4) запишется в виде

$$J_1 = \begin{vmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial \bar{r}_1} & \frac{\partial \dot{G}_1}{\partial \bar{r}_1} & \frac{\partial \ddot{G}_1}{\partial \bar{r}_1} & \frac{\partial G_2}{\partial \bar{r}_1} & \frac{\partial \dot{G}_2}{\partial \bar{r}_1} & \frac{\partial \ddot{G}_2}{\partial \bar{r}_1} \\ \frac{\partial G_1}{\partial \bar{V}_1} & \frac{\partial \dot{G}_1}{\partial \bar{V}_1} & \frac{\partial \ddot{G}_1}{\partial \bar{V}_1} & \frac{\partial G_2}{\partial \bar{V}_1} & \frac{\partial \dot{G}_2}{\partial \bar{V}_1} & \frac{\partial \ddot{G}_2}{\partial \bar{V}_1} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Запишем векторы через их координаты:

- $\bar{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$; $\bar{V}_i = (V_{xi}, V_{yi}, V_{zi})$; $|\bar{r}| = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ – модуль вектора;
- $|\Delta \bar{r}| = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2)^{1/2}$ – расстояние между аппаратами;
- $\bar{a}_p = (a_{px}, a_{py}, a_{pz})$ – орт вектора пульсара.

Тогда, например, $\partial G_1 / \partial \bar{r}_1$ в декартовых координатах будет представлять матрицу-столбец размерности 3×1 , т. е.

$$\frac{\partial G_1}{\partial \bar{r}_1} = \left(\frac{\partial G_1}{\partial x_1} \quad \frac{\partial G_1}{\partial y_1} \quad \frac{\partial G_1}{\partial z_1} \right)^T.$$

В нашем случае функция первого вида измерений

$$G_1 = |\Delta \bar{r}|,$$

производные от нее по времени

$$\dot{G}_1 = (\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2)(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2) / |\Delta \bar{r}|,$$

$$\ddot{G}_1 = |\Delta \bar{r}|^{-1}(\ddot{\bar{r}}_1 - \ddot{\bar{r}}_2)(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2) - |\Delta \bar{r}|^{-2}(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2)^2(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2)^2.$$

Функция второго вида измерений

$$G_2 = \Delta \tau = \Delta \bar{r} \cdot \bar{a}_p = (\bar{r}_1 - \bar{r}_2) \cdot \bar{a}_p.$$

Производные от нее по времени для центрального геополя:

$$\dot{G}_2 = (\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2) \cdot \bar{a}_p,$$

$$\ddot{G}_2 = \mu \left(\frac{\bar{r}_1}{|\bar{r}_1|^3} - \frac{\bar{r}_2}{|\bar{r}_2|^3} \right) \cdot \bar{a}_p.$$

Отсюда:

$$\frac{\partial G_1}{\partial \bar{r}_1} = (\bar{r}_1 - \bar{r}_2) \cdot |\Delta \bar{r}|^{-1} = b; \quad \frac{\partial G_1}{\partial \bar{V}_1} = 0,$$

$$\frac{\partial \dot{G}_1}{\partial \bar{r}_1} = |\Delta \bar{r}|^{-1}(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2)(1 - |\Delta \bar{r}|^{-2}(\bar{r}_1 - \bar{r}_2)^2) = c,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ddot{G}_1}{\partial \bar{r}_1} = & |\Delta \bar{r}|^{-1}(\ddot{\bar{r}}_1 - \ddot{\bar{r}}_2) - |\Delta \bar{r}|^{-3}(\bar{r}_1 - \bar{r}_2) \left((\bar{r}_1 - \bar{r}_2)((\ddot{\bar{r}}_1 - \ddot{\bar{r}}_2) + 3(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2)^2) - \right. \\ & \left. - 3|\Delta \bar{r}|^{-4}(\bar{r}_1 - \bar{r}_2)^3(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2)^2 \right) = d, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \dot{G}_1}{\partial \bar{V}_1} = (\bar{r}_1 - \bar{r}_2) |\Delta \bar{r}|^{-1} = b,$$

$$\frac{\partial \ddot{G}_1}{\partial \bar{V}_1} = -2(\bar{r}_1 - \bar{r}_2)^2(\dot{\bar{r}}_1 - \dot{\bar{r}}_2) |\Delta \bar{r}|^{-2} = e,$$

$$\frac{\partial G_2}{\partial \bar{r}_1} = \bar{a}_p; \quad \frac{\partial G_2}{\partial \bar{V}_1} = \frac{\partial \ddot{G}_2}{\partial \bar{V}_1} = 0,$$

$$\frac{\partial \dot{G}_2}{\partial \bar{r}_1} = 0; \quad \frac{\partial \dot{G}_2}{\partial \bar{V}_1} = \bar{a}_p,$$

$$\frac{\partial \ddot{G}_2}{\partial \bar{r}_1} = \mu \frac{|\bar{r}_1|^2 - 3(\bar{r}_1)^2}{|\bar{r}_1|^5} \cdot \bar{a}_p = a.$$

Запишем подробнее условные обозначения, например:

$$a_x = \mu \frac{|\bar{r}_1|^2 - 3x^2}{|\bar{r}_1|^5} \cdot a_{px}; \quad a_y = \mu \frac{|\bar{r}_1|^2 - 3y^2}{|\bar{r}_1|^5} \cdot a_{py}; \quad a_z = \mu \frac{|\bar{r}_1|^2 - 3z^2}{|\bar{r}_1|^5} \cdot a_{pz},$$

$b_x = (x_1 - x_2) / |\Delta \bar{r}|$ и т.д. с заменой числителя, например, для b_y на $y_1 - y_2$.

Соответственно, в обозначениях c_x, c_y, c_z и аналогично в d, e вектора $\bar{r}, \dot{\bar{r}}, \ddot{\bar{r}}$ заменяются их координатами.

Тогда (5) запишется:

$$J_1 = \begin{vmatrix} b_x & c_x & d_x & a_{px} & 0 & a_x \\ b_y & c_y & d_y & a_{py} & 0 & a_y \\ b_z & c_z & d_z & a_{pz} & 0 & a_z \\ 0 & b_x & e_x & 0 & a_{px} & 0 \\ 0 & b_y & e_y & 0 & a_{py} & 0 \\ 0 & b_z & e_z & 0 & a_{pz} & 0 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Переставив столбцы (6) получим с точностью до знака

$$J_1 = \begin{vmatrix} b_x & a_{px} & a_x & 0 & c_x & d_x \\ b_y & a_{py} & a_y & 0 & c_y & d_y \\ b_z & a_{pz} & a_z & 0 & c_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & a_{px} & b_x & e_x \\ 0 & 0 & 0 & a_{py} & b_y & e_y \\ 0 & 0 & 0 & a_{pz} & b_z & e_z \end{vmatrix}.$$

Откуда

$$\det J_1 = \begin{vmatrix} b_x & a_{px} & a_x \\ b_y & a_{py} & a_y \\ b_z & a_{pz} & a_z \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_{px} & b_x & e_x \\ a_{py} & b_y & e_y \\ a_{pz} & b_z & e_z \end{vmatrix}$$

и, стало быть, наблюдаемость системы будет обеспечена при условиях

$$\begin{aligned} b_x a_{py} a_z + a_{px} a_y b_z + b_y a_{pz} a_x &\neq b_z a_{py} a_x + a_{pz} a_y b_x + b_y a_{px} a_z, \\ a_{px} b_y e_z + b_x e_y a_{pz} + a_{py} b_z e_x &\neq a_{pz} b_y e_x + b_z e_y a_{px} + a_{py} b_x e_z. \end{aligned} \quad (7)$$

Следовательно, наблюдаемость сложным образом зависит как от расположения пульсара, так и от ориентации линии КА1-КА2 и весьма трудно найти случай, когда бы она не соблюдалась. Например, при $a_{px} = 1$, $a_{py} = a_{pz} = 0$ (случай, когда пульсар находится на оси x), очевидно что $a_y b_z \neq b_y a_z$; $b_y e_z \neq b_z e_y$.

При обратном переходе в (7) от условных обозначений к значениям соответствующих производных, после сокращения на заведомо ненулевые параметры, первое неравенство примет вид:

$$\begin{aligned} (x_1 - x_2)(|\bar{r}_1|^2 - 3z^2)a_{py}a_{pz} + (z_1 - z_2)(|\bar{r}_1|^2 - 3y^2)a_{px}a_{py} + \\ + (y_1 - y_2)(|\bar{r}_1|^2 - 3x^2)a_{px}a_{pz} \neq \\ \neq (z_1 - z_2)(|\bar{r}_1|^2 - 3x^2)a_{py}a_{pz} + (x_1 - x_2)(|\bar{r}_1|^2 - 3y^2)a_{py}a_{pz} + \\ + (y_1 - y_2)(|\bar{r}_1|^2 - 3z^2)a_{px}a_{pz}, \end{aligned} \quad (8)$$

второе неравенство –

$$\begin{aligned} (y_1 - y_2)(z_1 - z_2)^2(V_{x_1} - V_{x_2})a_{px} + (x_1 - x_2)(y_1 - y_2)^2(V_{y_1} - V_{y_2})a_{pz} + \\ + (z_1 - z_2)(x_1 - x_2)^2(V_{x_1} - V_{x_2})a_{py} \neq \\ \neq (y_1 - y_2)(x_1 - x_2)^2(V_{x_1} - V_{x_2})a_{pz} + (z_1 - z_2)(y_1 - y_2)^2(V_{y_1} - V_{y_2})a_{px} + \\ + (x_1 - x_2)(z_1 - z_2)^2(V_{z_1} - V_{z_2})a_{py}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из (8) и (9) очевидно, что неравенства действительно соблюдаются, и поэтому наблюдаемость пульсарной навигации становится доказанной.

Основным конструктивным элементом любой космической системы навигации являются матрицы W местных градиентов функций измерений по оцениваемым параметрам орбиты. Каноническое уравнение навигации весьма просто:

$$\Delta q = W^{-1} \Delta G',$$

где Δq – поправка к опорной орбите;

$\Delta G'$ – невязки измерений, равные разности измеренных значений функций и их рассчитанных значений на опорной орбите.

Поэтому основным расчетным параметром являются градиенты измерений. Для пульсарной навигации согласно (1) и (2) градиенты первого КА

$$w_{1i} = \frac{\partial |\Delta \bar{r}|}{\partial r_{1i}} = (r_{1i} - r_{2i}) |\Delta \bar{r}|^{-1}, \quad (10)$$

$$w_{2i} = \frac{\partial \Delta \tau}{\partial r_{1i}} = a_{pi} (1 - (r_{1i} - r_{2i})^2 |\Delta \bar{r}|^{-2}) |\Delta \bar{r}|^{-1}.$$

Градиенты второго КА по знаку обратны приведенным в (10). Сравнение правых частей уравнений (10) показывает, что производные слабо зависимы друг от друга. Следовательно, решение навигационной задачи возможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование на основе анализа наблюдаемости задачи и получаемой независимости рассчитываемых градиентов выбранных измерений доказывает возможность решения задачи самоопределения движения двух КА, принимающих сигналы пульсара и рассчитывающих свои орбиты независимо друг от друга, по виртуальному методу измерений зенитных расстояний звезд. На большинство разработанных алгоритмов решения задач навигации и ориентации получены патенты.

Список используемых источников

1. Кузнецов В.И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: монография: в 2 ч. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – Ч. 1. – 289 с.; ч. 2 – 164 с.
2. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Система автономной навигации и ориентации ИСЗ, основанная на виртуальных измерениях зенитных расстояний звезд // Космические исследования. – 2011. – Т. 49, № 6. – С.555–562.
3. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Автономная астрономическая система навигации и слежения // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 8. – С.625–638 (167–172).
4. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Многофункциональная астрономическая самоорганизующаяся система автономной навигации и ориентации искусственных спутников Земли // Космические исследования. – 2017. – Т. 55, № 2. – С.150–166.

5. Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Архипова М.А. Основные результаты применения автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов // Научные технологии в космических исследованиях Земли: научно-технический журнал. – 2018. – Т.10, вып.1. – С.4–13.
6. Пат. 2318188 РФ, МПК G 01 C 21/24. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов / Кузнецов В.И., Данилова Т.В.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – Заявл. 17.07.06; опубл. 27.02.08, Бюл. № 6. – 10 с.
7. Пат. 2454631 РФ, МПК G 01 C 21/02. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов на основе виртуальных измерений зенитных расстояний звезд / Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Косулин Д.М.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – Заявл. 28.10.10; опубл. 27.06.12, Бюл. № 18. – 12 с.
8. Пат. 2542599 РФ, МПК G 01 C 21/02. Способ автономного определения орбиты и ориентации корпуса космического аппарата в пространстве при отсутствии априорной информации / Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Косулин Д.М., Архипова М.А.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – Заявл. 18.06.13; опубл. 20.02.15, Бюл. № 5. – 16 с.
9. Пат. 2624408 РФ, МПК G 01 C 21/24. Способ автономного оценивания изменений орбиты визируемого космического аппарата / Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Архипова М.А.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – Заявл. 01.12.15.; опубл. 03.07.17, Бюл. № 19. – 22 с.
10. Малов И.Ф. Радиопульсары. – М.: Наука, 2004. – 191 с.
11. Малофеев В.М. Измерение и анализ энергетических характеристик радиоизлучений пульсаров: дис. доктора физико-мат. наук. – М., 1999. – 134 с.
12. Илясов Ю.П. Пульсарная шкала времени // Труды ФИАН. – М.: Наука, 1989. – Т.199. – С. 149.
13. Малов И.Ф., Марабели Г.З. Аномальные пульсары. – М.: Наука, 2009. – 138 с.
14. Дорошенко О.Ф., Копейкин С.М. Алгоритм высокоточного фазового анализа наблюдений одиночных пульсаров // Астрономический журнал. – 1990. – Вып.5, т. 67. – С. 986–998.
15. Потапов В.А. Хронометрирование миллисекундных пульсаров в присутствии низкочастотных шумов: дис. канд. физико-мат. наук. – М., 2006. – 119 с.
16. Копейкин С.М. Релятивистские системы отсчета в Солнечной системе // Астрономический журнал. – 1989. – Вып.5, т. 66. – С. 1069–1079.
17. Радиоастрономическая техника и методы: труды ФИАН. – М.: Наука, 2000. – Ч. 1: Космические проекты. – 181 с.
18. Радиоастрономическая техника и методы: труды ФИАН. – М.: Наука, 2000. – Ч. 2: Наземные радиотелескопы, аппаратура и методы. – 247 с.
19. Резников Б.А. О параметрической наблюдаемости космических аппаратов // Космические исследования. – 1968. – № 6, вып.3. – С.312–315.
20. Ковалев А.М. Нелинейные задачи управления и наблюдения в теории динамических систем. – Киев: Наукова думка, 1980. – 175 с.
21. Костюковский Ю.М.-Л. О наблюдаемости нелинейных управляемых систем // Автоматика и телемеханика. – 1968. – №9. – С.29–42.
22. Брандин В.Н., Костюковский Ю.М.-Л., Разоренов Г.Н. Глобальные условия наблюдаемости нелинейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. – 1975. – №10. – С.18–25.
23. Брандин В.Н., Разоренов Г.Н. Определение траекторий космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
24. Копейкин С.М. Асимптотические сшивки гравитационных полей в Солнечной системе // Астрономический журнал. – 1989. – Т. 66, вып.6. – С.1289–1295.

В.М. Лихачев,
доктор техн. наук, профессор;
В.А. Проданец,
кандидат техн. наук, доцент

КОРОТКОВОЛНОВАЯ ЛУЧЕВАЯ АСИМПТОТИКА В ЗАДАЧАХ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В УГЛОВЫХ ОБЛАСТЯХ

В статье представлены теоретические основы решения задач рассеяния электромагнитных волн на импедансных клиновидных структурах в квазиоптическом частотном диапазоне. Особое внимание уделено радиофизическим закономерностям, отражающим особенности рассеяния цилиндрических электромагнитных волн в импедансных угловых областях. Изложены основы используемого для решения указанных дифракционных задач метода Зоммерфельда–Малюжинца, описаны математические алгоритмы, позволяющие учитывать влияние электромагнитного поля падающей волны на радиофизические характеристики рассеяния рассматриваемых клиновидных структур.

Ключевые слова: дифракция, цилиндрическая волна, импедансный клин, асимптотическое решение, дальняя зона, квазиоптический диапазон, дифракционный коэффициент, фазовая составляющая.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема исследования дифракции электромагнитных волн в областях, ограниченных сложными поверхностями при наличии на них угловых (клиновидных) образований, имеет важное прикладное значение для расчета электромагнитных полей, возбуждаемых объектами сложной архитектуры с различными электрическими характеристиками на их поверхности.

Одной из основных электродинамических задач, лежащих в основе данной проблемы, является задача о дифракции цилиндрических электромагнитных волн (ЭМВ) в области, ограниченной двугранным углом (клином) с полубесконечными гранями, имеющими определенные электрические характеристики поверхности, называемые «импедансными» характеристиками (которые будут определены в дальнейшем).

Наиболее существенные результаты по данной задаче были получены в работах, в основе которых лежит так называемый метод Зоммерфельда–Малюжинца, оказавшийся наиболее эффективным при решении задач данного класса в квазиоптическом диапазоне длин волн. Основой метода является представление определяемого поля дифракции в интегральной форме на основании контурного интеграла Зоммерфельда [1].

Однако решения, полученные в интегральной форме, не применимы для задач прикладной электродинамики, как с вычислительной точки зрения (ввиду отсутствия вычислительных алгоритмов), так и с точки зрения анализа поля дифракции, поскольку не обладают физической наглядностью. Поэтому практический интерес представляет построение, на основе точного решения, асимптотического решения указанной дифракционной задачи, имеющего наглядную геометрическую и физическую интерпретацию и дающего возможность проведения конкретных вычислений, как поля дифракции в целом, так и его отдельных составляющих.

Таким образом, целью данной работы является представление теоретических основ и вычислительного алгоритма асимптотического решения задачи дифракции цилиндрических электромагнитных волн на импедансных клиновидных структурах в квазиоптическом частотном диапазоне.

Рассмотрим задачу о дифракции цилиндрической ЭМВ на импедансном клине с полубесконечными гранями как граничную задачу математической теории дифракции (раздел математической физики).

Пусть в пространстве R^3 имеет место клиновидная область (двугранный угол), ограниченная двумя импедансными полуплоскостями.

Введем цилиндрическую систему координат (r, φ, z) так, чтобы ось OZ совпадала с ребром клина, тогда положение граней определяется уравнениями $\varphi = \pm \Phi$, полагаем $\Phi \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi \right]$ (рис.1).

Электромагнитная волна, облучающая импедансный клин («падающая»), возбуждается нитевидным электромагнитным источником Q , параллельным ребру. Тогда положение источника определяется координатами $Q(r_0, \varphi_0)$ $|\varphi_0| \leq \Phi$, вследствие чего падающая ЭМВ является цилиндрической.

Полагаем, что временная зависимость (временная составляющая) всех исследуемых ЭМВ определена множителем $e^{-i\omega t}$, и в дальнейшем будем рассматривать стационарные электромагнитные поля, не содержащие указанного временного сомножителя.

Как известно, ЭМВ, облучающие реальные объекты, имеют определенную поляризацию. Возникающее при этом поле дифракции можно представить в виде двух ортогонально поляризованных полей, характеризующихся E - и H -поляризациями. В случае E -поляризации комплексная амплитуда \vec{E} вектора напряженности электрического поля параллельна ребру:

$\vec{E} = \dot{E}_z \vec{l}_z$, $(\vec{l}_r, \vec{l}_\varphi, \vec{l}_z)$ – ортонормированный базис цилиндрической системы координат. В случае H -поляризации комплексная амплитуда \vec{H} вектора напряженности магнитного поля параллельна ребру $\vec{H} = \dot{H}_z \vec{l}_z$. Такая ориентация векторов напряженности поля приводит к тому, что $\dot{E}_z = \dot{E}_z(r, \varphi)$, $\dot{H}_z = \dot{H}_z(r, \varphi)$, где (r, φ) – полярные координаты точки наблюдения, $|\varphi| \leq \Phi$. Далее будем полагать, что $r \geq r_0$.

Тогда векторы напряженности поля дифракции ЭМВ в случае E -поляризации и H -поляризации определяются соответствующими векторными функциями:

$$\vec{E} = \dot{E} e^{-i\omega t} \quad \text{и} \quad \vec{H} = \dot{H} e^{-i\omega t}.$$

В дальнейшем рассмотрим граничную задачу для случая H -поляризации, т. е. ограничимся рассмотрением магнитного поля.

В случае H -поляризации функция \dot{H}_z (амплитуда напряженности магнитного поля) в клиновидной области $-\Phi \leq \varphi \leq \Phi$ удовлетворяет уравнению Гельмгольца

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial \varphi^2} + k^2 \dot{H}_z = 0, \quad \text{где} \quad k = \sqrt{\varepsilon \mu} \quad (\text{или} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}). \quad (1)$$

На полубесконечных гранях функция \dot{H}_z удовлетворяет граничным условиям Леонтовича

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \varphi} - ik \frac{Z_{\pm}}{Z_0} \dot{H}_z = 0, \quad (2)$$

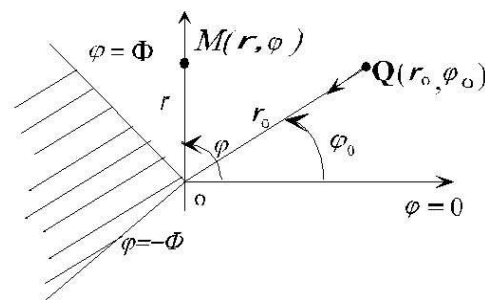


Рис.1. Взаиморасположение точек падения и наблюдения относительно импедансного клина

где $Z_0 = 120 \pi \text{ Ом}$ – волновое сопротивление свободного пространства, а грани заданы уравнениями $\varphi = \pm \Phi$;
 Z_{\pm} – поверхностные волновые сопротивления (поверхностный импеданс) граней, соответственно $\varphi = \Phi$ и $\varphi = -\Phi$.

Замечание. В случае E -поляризации функция \dot{E}_z (амплитуда напряженности электрического поля) в клиновидной области $-\Phi \leq \varphi \leq \Phi$ также удовлетворяет уравнению Гельмгольца

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial \varphi^2} + k^2 \dot{E}_z = 0.$$

На полубесконечных гранях функция \dot{E}_z удовлетворяет граничным условиям Леонтовича

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \varphi} + ik \frac{Z_0}{Z_{\pm}} \dot{E}_z = 0 \Big|_{\varphi = \pm \Phi}.$$

Полагаем $\sin \theta_{\pm}^H = \frac{Z_{\pm}}{Z_0}$, тогда $\theta_{\pm}^H = \xi'_{\pm} - i\xi''_{\pm}$ – импедансные характеристики граней,

$\xi'_{\pm} \geq 0$, $\xi''_{\pm} \geq 0$ вследствие указанной ранее временной зависимости.

В соответствии с требованиями теоремы единственности решения, для функции \dot{H}_z должны выполняться:

– условие излучения на бесконечности

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} + ik \dot{H}_z \right) = 0; \quad (3)$$

– условие на ребре

$$\lim_{r \rightarrow 0} \dot{H}_z = \text{const}. \quad (4)$$

Если $Z_{\pm} = 0$, то импедансная граничная задача вырождается в граничную задачу Неймана

$$\text{для } \dot{H}_z: \left(\frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \varphi} = 0, \varphi = \pm \Phi \right).$$

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ

Согласно [2] решение граничной задачи для амплитуды \dot{H}_z вектора напряженности магнитного поля, возбуждаемого источником $\mathbf{Q}(\mathbf{r}_0, \varphi_0)$ в произвольной точке наблюдения $M(r, \varphi)$, $-\Phi \leq \varphi \leq \Phi$, определяется выражением:

$$\dot{H}_z(r, \varphi) = -i \frac{k \dot{I}_0^M}{4\Phi} \int_C \frac{\cos \left[\left(\frac{\pi}{2\Phi} \right) (\alpha + \varphi) \right]}{\Psi(\alpha + \varphi)} e^{ikr \cos \alpha} \times \int_{\gamma} \frac{\Psi(\beta + \varphi_0) e^{-ikr_0 \cos \beta} d\beta}{\sin \left[\left(\frac{\pi}{2\Phi} \right) (\beta + \varphi_0) \right] - \sin \left[\left(\frac{\pi}{2\Phi} \right) (\alpha + \varphi) \right]} d\alpha, \quad (5)$$

здесь

$$\Psi(\delta) = \cos \left[\left(\frac{\pi}{4\Phi} \right) (\delta + \Phi - \theta_+) \right] \cos \left[\left(\frac{\pi}{4\Phi} \right) (\delta - \Phi + \theta_-) \right] \times$$

$$\times \frac{\Psi_{\Phi} \left(\delta + \Phi - \frac{\pi}{2} + \theta_+ \right) \Psi_{\Phi} \left(\delta - \Phi + \frac{\pi}{2} - \theta_- \right)}{\Psi_{\Phi} \left(\delta + \Phi - \frac{\pi}{2} - \theta_+ \right) \Psi_{\Phi} \left(\delta - \Phi + \frac{\pi}{2} + \theta_- \right)}; \quad (6)$$

I_0^M – комплексная амплитуда линейной плотности магнитного тока в нитевидном источнике; 2Φ – угол раствора клина; $\Psi_{\Phi}(z)$ – специальная функция Малюжинца, $z = x_1 + ix_2$.

Контур интегрирования γ и C показаны на рис.2 и рис.3.

Полагаем $kr \gg 1, kr_0 \gg 1$. Это соответствует расположению источника Q и точки наблюдения M в дальней зоне относительно ребра клина.

Функция Малюжинца, являющаяся основной в представлении поля дифракции интегралом (5), имеет следующее интегральное представление:

$$\Psi_{\Phi}(z) = \exp \left\{ -0,5 \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(zs) - 1}{s \operatorname{ch}(\pi s / 2) \operatorname{sh}(2\Phi s)} ds \right\}. \quad (7)$$

Интеграл в формуле (7) сходится в полосе $|\operatorname{Re} z| < \frac{\pi}{2} + 2\Phi$.

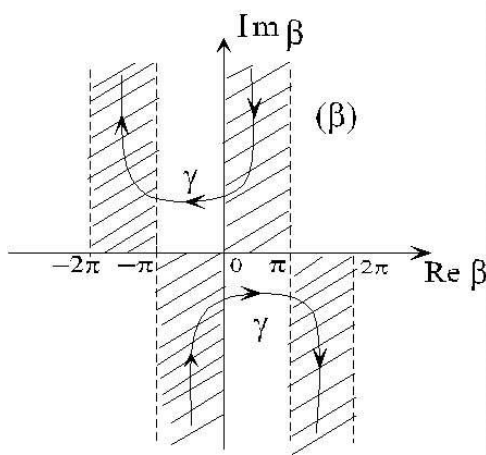


Рис. 2. Контур интегрирования γ

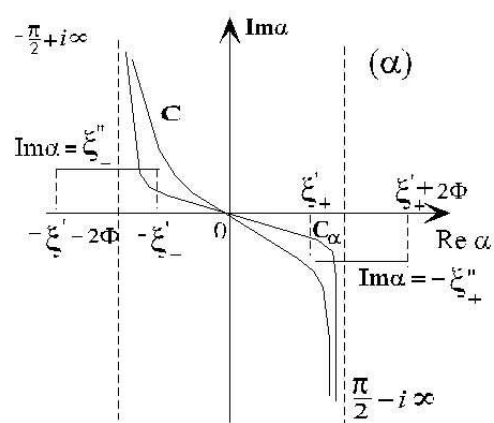


Рис. 3. Контур интегрирования C

Вне этой полосы значения функции $\Psi_{\Phi}(z)$ определяются с помощью следующих функциональных равенств:

$$\Psi_{\Phi}(z) = \operatorname{ctg} \left(\frac{z}{2} - \Phi + \frac{\pi}{4} \right) \Psi_{\Phi}(z - 4\Phi); \quad \Psi_{\Phi}(z) \Psi_{\Phi}(z - \pi) = \Psi_{\Phi}^2 \left(\frac{\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{\pi}{4\Phi} \left(z - \frac{\pi}{2} \right) \right). \quad (8)$$

В работе [3] разработан способ вычисления функции $\Psi_{\Phi}(z)$, основанный на представлении ее совокупностью степенных рядов.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ

Итак, будем полагать, что $r \geq r_0, \frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$. Построение асимптотического решения для случая цилиндрической электромагнитной волны возможно при условиях $kr \gg 1, kr_0 \gg 1$ и связано с поведением полюсов подынтегральных функций в (5), характером взаимосвязи

между полюсами подынтегральных функций внутреннего и внешнего интегралов, а также полюсами внутреннего интеграла и точкой перевала внешнего интеграла, полюсами внешнего интеграла и точкой перевала внутреннего. Представим контур интегрирования γ на комплексной плоскости (β) (см. рис.2) в виде совокупности трех контуров $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ (рис.4) и деформируем контур интегрирования C на комплексной плоскости (α) в перевальный контур C_α (см. рис.3). Тогда интеграл (5) преобразуется к виду:

$$\dot{H}_z(r, \varphi) = i \frac{k I_0^M}{4\Phi} \int_{C_\alpha} \frac{e^{ikr \cos \alpha}}{\Psi(\alpha + \varphi)} \left[\sum_{m=0}^2 I_m \right] d\alpha, \quad (9)$$

где $I_m = \int_{\gamma_m} F(\alpha, \beta) e^{-ikr_0 \cos \beta} d\beta$, $m = 0, 1, 2$,

$$F(\alpha, \beta) = \Psi(\beta + \varphi_0) \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2\Phi} (\alpha + \varphi) \right]}{2 \sin \left[\frac{\pi}{4\Phi} (\beta + \varphi_0 - \alpha - \varphi) \right] \sin \left[\frac{\pi}{4\Phi} (\beta + \varphi_0 + \alpha + \varphi - 2\pi) \right]}.$$

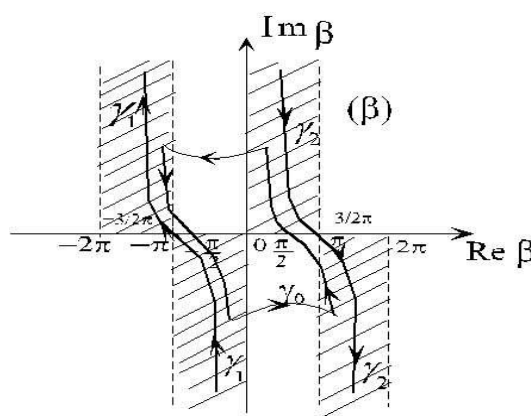


Рис. 4. Трансформация контура интегрирования γ

В дальнейшем, для различных типов полей дифракции, функция \dot{H}_z будет определяться путем вычисления соответствующих контурных интегралов из равенства (9) методом перевала и по вычетам в полюсах подынтегральных функций. Для этого рассмотрим поведение указанных полюсов из соотношения (9) на комплексных плоскостях (α) и (β).

Из всей серии полюсов функции $\frac{1}{\Psi(\alpha + \varphi)}$ в полосу $|\operatorname{Re} \alpha| < \frac{\pi}{2}$ в плоскости (α), при условии $\frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$, попадают лишь два полюса:

$$\alpha_{\pm} = -\varphi \pm \Phi \pm \theta_{\pm}. \quad (10)$$

Полюсы α_{\pm} при изменении φ от Φ до $-\Phi$ перемещаются на плоскости (α) вдоль прямых $\operatorname{Im} \alpha = \xi_{\pm}''$ в полосах $-\xi_{-}' - 2\Phi \leq \operatorname{Re} \alpha \leq -\xi_{-}'$ и $\xi_{+}' \leq \operatorname{Re} \alpha \leq \xi_{+}' + 2\Phi$, как показано на рис.3.

При вычислении интеграла по контуру C , при выполнении условий $kr \gg 1$ и $kr_0 \gg 1$, методом перевала перевальный контур C_α (т. е. кривая наибыстрейшего спуска) определяется уравнением [4]

$$\operatorname{Re} \alpha = \arccos \frac{1}{\operatorname{ch}(\operatorname{Im} \alpha)}, \quad (11)$$

то есть $\operatorname{Re} \alpha = \operatorname{gd}(\operatorname{Im} \alpha)$.

Фазовый множитель $e^{ikr \cos \alpha}$ из (5) показывает, что точка перевала контура C_α

$$\alpha_{\text{перев}} = 0. \quad (12)$$

В процессе деформации контура C в перевальный C_α им пересекаются полюсы α_\pm , если

$$|\operatorname{Re} \alpha_\pm| < \arccos \frac{1}{\operatorname{ch}(\xi_\pm''')}.$$

Выражение функции \dot{H}_z в этом случае определяется суммой перевального асимптотического разложения интеграла по контуру C_α и вычетов подынтегральной функции в полюсах α_\pm .

Как будет ясно в дальнейшем, перевальное асимптотическое разложение лежит в основе формирования поверхностью клина дифракционного поля рассеяния ЭМВ в дальней зоне (так называемое поле излучения), а вычеты в полюсах α_\pm являются основой формирования поля поверхностных волн различных типов, распространяющихся вдоль импедансных граней.

В данной статье ограничимся расчетом и анализом дифракционного поля излучения.

Из серии полюсов функции $\Psi(\beta + \varphi_0)$ на плоскости (β) ни один полюс не попадает в полосу $|\operatorname{Re} \beta| \leq \pi$ при условии $\frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$.

Полюсы

$$\beta_\pm = -\varphi_0 \pm \Phi \pm \pi \pm \theta_\pm \quad (13)$$

есть ближайшие к полосе $|\operatorname{Re} \beta| \leq \pi$, но расположенные вне ее.

Они могут быть пересечены при деформации контуров интегрирования γ_1 и γ_2 в перевальные контуры.

Кроме того, в полосу $|\operatorname{Re} \beta| < \pi$ попадают полюсы функций:

$$\left[\sin \left(\frac{\pi}{4\Phi} (\beta + \varphi_0 - \alpha - \varphi) \right) \right]^{-1} \quad \text{и} \quad \left[\sin \left(\frac{\pi}{4\Phi} (\beta + \varphi_0 + \alpha + \varphi - 2\Phi) \right) \right]^{-1}, \quad (14)$$

соответствующие точке перевала $\alpha = 0$:

$$\text{а) } \beta_{\alpha=0}^{(1)} = -\varphi_0 + \varphi; \quad \text{б) } \beta_{n,\alpha=0}^{(2)} = -\varphi_0 + (-1)^n \varphi + 2n\Phi \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (15)$$

В случае, когда $\frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$, из серии (15) в полосу $|\operatorname{Re} \beta| \leq \pi$ попадают лишь полюсы

$$\beta_{\alpha=0}^{(2)\pm} = -\varphi_0 - \varphi \pm 2\Phi. \quad (16)$$

Полюсы $\beta_{\alpha=0}^{(1)}$ и $\beta_{\alpha=0}^{(2)\pm}$ располагаются внутри контура γ_0 .

Другие полюсы в этой работе не рассматриваются, поскольку они не связаны с формированием поля излучения.

Как видно из рис.4, контуры интегрирования γ_1 и γ_2 в интегралах I_1 , I_2 имеют противоположные направления обхода:

$$I_1 = \int_{-\pi-\varepsilon-i\infty}^{-\pi-\varepsilon+i\infty} F(\alpha, \beta) e^{-ikr_0 \cos \beta} d\beta; \quad I_2 = \int_{\pi-\varepsilon+i\infty}^{\pi-\varepsilon-i\infty} F(\alpha, \beta) e^{-ikr_0 \cos \beta} d\beta. \quad (17)$$

Введем обозначение $I = I_1 + I_2$.

Применим в интеграле I_1 замену переменной $\beta = -\pi + i\chi$, а в I_2 - замену переменной $\beta = \pi - i\chi$. Тогда контуры γ_1 и γ_2 отобразятся в контур γ_χ на комплексной плоскости (χ), изображенный на рис. 5.

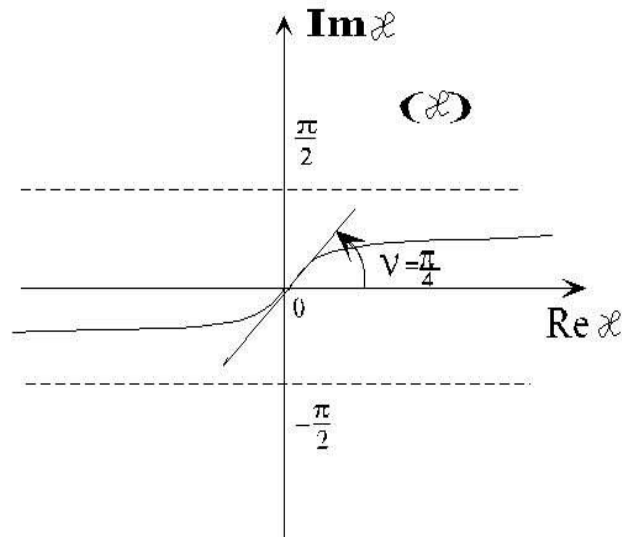


Рис. 5. Трансформация контуров γ_1 и γ_2 в контур интегрирования γ_χ

Получим интеграл

$$I_\chi = i \int_{\gamma_\chi} \{F(\alpha, -\pi + i\chi) - F(\alpha, \pi - i\chi)\} e^{ikr_0 \cos \chi} d\chi. \quad (18)$$

Тогда полюсам β_\pm (13) будут соответствовать полюсы

$$\chi_\pm = i(\mp \varphi_0 + \Phi + \theta_\pm), \quad (19)$$

а функция $F(\alpha, -\pi + i\chi) - F(\alpha, \pi - i\chi)$ задана на комплексной плоскости (χ).

Таким образом,

$$\dot{H}_z(r, \varphi) = i \frac{k I_0^M}{4\Phi} \int_{C_\alpha} \frac{e^{ikr \cos \alpha}}{\Psi(\alpha + \varphi)} [I_0 + I_\chi] d\alpha. \quad (20)$$

При деформации контуров γ_1 и γ_2 в перевальные контур γ_χ также деформируется в перевальный контур γ_χ^Π . Фазовый множитель $e^{ikr_0 \text{ch} \chi}$ из (18) показывает, что точка перевала контура γ_χ^Π

$$\chi_{\text{перев}} = 0. \quad (21)$$

В дальней зоне поле излучения $\dot{H}_z^D(r, \varphi)$ электромагнитных волн, возбуждаемых и рассеиваемых поверхностью клина при падении на нее цилиндрической ЭМВ источника, представлено в виде суммы слагаемых, определяющих магнитные поля излучения различных типов (так называемые парциальные составляющие поля излучения).

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Полагая $kr_0 \gg 1$ и $kr \gg 1$, вычислим интеграл по контуру C_α методом перевала ($\alpha_{\text{перев}} = 0$), а интеграл по замкнутому контуру γ_0 – по вычетам в полюсах $\beta_{\alpha=0}^{(1)}$; $\beta_{\alpha=0}^{(2)\pm}$ (16) при условиях: $|\varphi| \leq \Phi$, $|\varphi_0| \leq \Phi$, $|\varphi - \varphi_0| < \pi$, $|\varphi_0 - \varphi \pm 2\Phi| < \pi$, $\frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$. Тогда, ограничиваясь главными частями асимптотических разложений, получим соответственно:

$$\dot{H}_{z \text{ пад}} = kI_0^M \sqrt{\frac{2\pi}{kr}} e^{i \left[kS_n - \frac{\pi}{4} \right]} + O((kr)^{-\frac{3}{2}}), \quad (22)$$

$$\dot{H}_{z \text{ отр}}^\pm = -kI_0^M \frac{\Psi(-\varphi \pm 2\Phi)}{\Psi(\varphi)} \sqrt{\frac{2\pi}{kr}} \cdot e^{i \left[kS_{\text{отр}}^\pm - \frac{3\pi}{4} \right]} + O((kr)^{-\frac{3}{2}}). \quad (23)$$

Анализ структуры амплитудных и фазовых множителей функций $\dot{H}_{z \text{ пад}}$ и $\dot{H}_{z \text{ отр}}^\pm$ показывает, что соотношение (22) определяет амплитуду напряженности магнитного поля цилиндрической ЭМВ, распространяющейся («падающей») от источника $Q(r_0, \varphi_0)$ в точку наблюдения $M(r, \varphi)$, а соотношение (23) определяет амплитуду напряженности магнитного поля цилиндрической ЭМВ, попадающей в точку наблюдения $M(r, \varphi)$ после отражения от импедансных граней.

Из неравенств $|\varphi_0 - \varphi \pm 2\Phi| < \pi$ и $\frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$ следует, что полюсы $\beta_{\alpha=0}^{(2)\pm}$ одновременно не могут находиться внутри контура γ_0 . Поэтому в сумму парциальных составляющих будет входить только одна: $\dot{H}_{z \text{ отр}}^-$ или $\dot{H}_{z \text{ отр}}^+$, т. е. в точку наблюдения попадает цилиндрическая ЭМВ, отраженная только от одной из двух импедансных граней. Отраженная от другой грани, в точку наблюдения не попадает. Функции $S_n = r - r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)$ и $S_{\text{отр}}^\pm = r - r_0 \cos(-\varphi_0 - \varphi \pm 2\Phi)$ – эйконалы, определяющие расстояния, проходимые ЭМВ от источника Q до точки наблюдения M .

Вычисляя интеграл I_χ по контуру γ_χ^{Π} и далее интеграл по контуру C_α методом перевала, ограничиваясь главной частью асимптотического разложения, получим:

$$\dot{H}_{z \text{ диф}} \cong \frac{k I_0^M}{2\Phi} \frac{\pi}{\sqrt{kr}} \frac{1}{\sqrt{kr_0}} D(\varphi_0, \varphi, \theta_\pm) e^{ik(r+r_0)}, \quad (24)$$

где

$$D(\varphi_0, \varphi, \theta_\pm) = \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2\Phi}\varphi\right]}{\Psi(\varphi)} \left(\frac{\Psi(-\pi - \varphi_0)}{\sin\left[\frac{\pi}{4\Phi}(-\pi + \varphi_0 - \varphi)\right]\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(-\pi + \varphi_0 + \varphi)\right]} - \frac{\Psi(\pi + \varphi_0)}{\sin\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \varphi_0 - \varphi)\right]\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \varphi_0 + \varphi)\right]} \right),$$

$r + r_0$ – эйконал.

Анализ структуры амплитудного и фазового множителей в выражении (24) показывает, что данное выражение в дальней зоне определяет амплитуду напряженности магнитного поля цилиндрической ЭМВ, рассеянной в пространство ребром импедансного клина при падении на него цилиндрической ЭМВ от источника.

Таким образом, $\dot{H}_{z \text{ диф}}$ определяет поле дифракции на ребре ЭМВ, возбуждаемой источником, $D(\varphi_0, \varphi, \theta_\pm)$ есть коэффициент дифракции.

Вычисляя внутренний интеграл I_χ по вычетам в полюсах χ_\pm , а внешний интеграл по контуру C_α методом перевала при условиях $kr \gg 1$, $|\Phi - \varphi_0| \leq \frac{\pi}{2}$, ограничиваясь главной частью асимптотического разложения, получим:

$$\dot{H}_{z \text{ диф пов}} = \pm k I_0^M \frac{\pi}{4\Phi} \sqrt{\frac{2\pi}{kr}} \Psi_1 \Psi_2 e^{ik(S_{\text{диф.п.}} - \frac{\pi}{4})}, \quad (25)$$

где

$$\Psi_1 = \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2\Phi}\varphi\right]\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \theta_+ + \theta_-)\right]\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + 2\Phi)\right]}{\Psi(\varphi)\sin\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \Phi + \theta_\pm \mp \varphi)\right]\Psi'_\Phi\left(\frac{\pi}{2} + 2\Phi\right)},$$

$$\Psi_2 = \frac{\Psi'_\Phi\left(\frac{\pi}{2} + 2\Phi + 2\theta_\pm\right)\Psi_\Phi\left(\pm\frac{3}{2}\pi + \theta_+ + \theta_-\right)}{\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \Phi + \theta_\pm \pm \varphi)\right]\Psi_\Phi\left(\frac{3}{2}\pi + \theta_+ + \theta_-\right)}.$$

Эйконал представлен выражением

$$S_{\text{диф пов}} = r + r_0 \cos(\mp\varphi_0 + \Phi + \theta_\pm). \quad (26)$$

Анализ структуры амплитудного и фазового множителей в выражении $\dot{H}_{z \text{ диф пов}}$ показывает, что соотношение (25) характеризует амплитуду напряженности магнитного поля, возникающего в дальней зоне вследствие дифракции (рассеяния в пространство) на ребре поверхностных волн, возбуждаемых падающей цилиндрической ЭМВ источника на импедансных гранях.

При возрастании r_0 и ξ''_{\pm} функция $\dot{H}_{z \text{ диф пов}}$ монотонно убывает. Таким образом, поле излучения определяется суммой вида:

$$\dot{H}_z^D(r, \varphi) = \dot{H}_{z \text{ пад}} + \dot{H}_{z \text{ отр}}^{\pm} + \dot{H}_{z \text{ диф}} + \dot{H}_{z \text{ диф пов}}^{\pm}.$$

Количественные соотношения между слагаемыми существенно зависят от взаимного расположения источника, ребра и точки наблюдения.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ИМПЕДАНСНЫХ КЛИНОВИДНЫХ СТРУКТУРАХ

Полученные результаты позволяют произвести численное моделирование процессов дифракции цилиндрических волн на импедансных клиновидных образованиях в квазиоптическом частотном диапазоне, а также анализ поведения полей дифракции и их парциальных составляющих в широком диапазоне изменения геометрических и электродинамических параметров. В процессе анализа можно выявить важные для приложений электродинамические дифракционные свойства клиновидных структур.

Например, минимум амплитудной диаграммы направленности поля дифракции рассеянных в пространство ребром клина электромагнитных волн (ЭМВ) источника ($\dot{H}_{z \text{ диф}}$), как правило, соответствует полярному углу φ_0 источника падающей ЭМВ, т.е. диаграмма достигает наименьшей амплитуды в направлении на источник (рис. 6), который может быть источником радиолокационного сигнала.

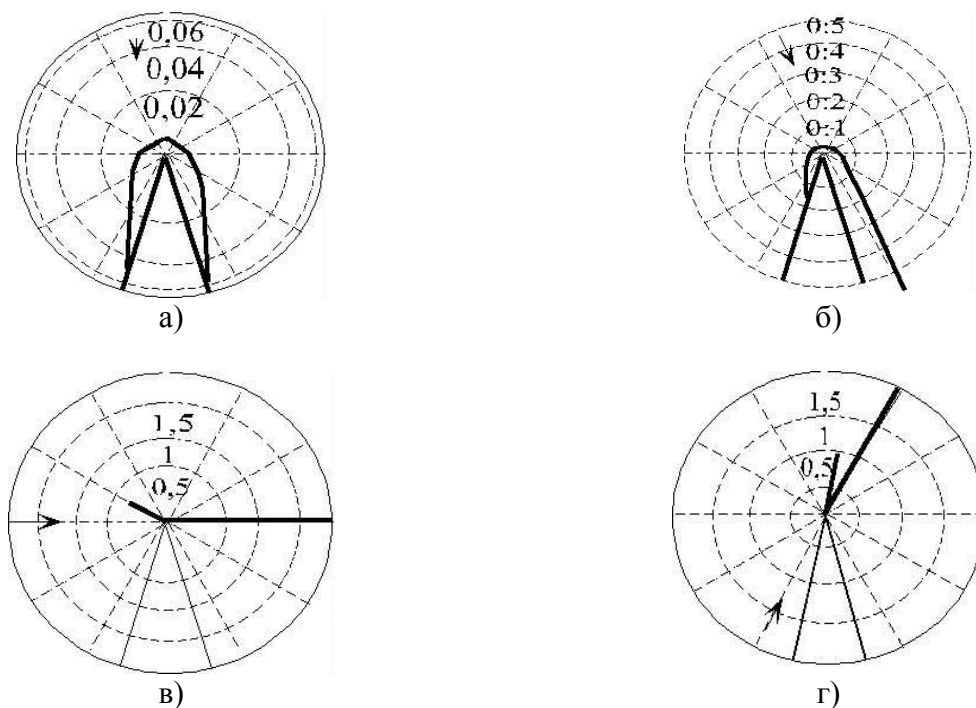


Рис. 6. Диаграмма направленности поля дифракции ЭМВ источника на ребре клина:

$a - \varphi_0 = 3^\circ \quad \Phi = 162^\circ \quad \theta_- = -1,2i \quad \theta_+ = -1,2i$; $b - \varphi_0 = 20^\circ \quad \Phi = 162^\circ \quad \theta_- = -0,6i \quad \theta_+ = -0,6i$;
 $v - \varphi_0 = 90^\circ \quad \Phi = 162^\circ \quad \theta_- = -0,6i \quad \theta_+ = -0,6i$; $z - \varphi_0 = 150^\circ \quad \Phi = 162^\circ \quad \theta_- = -0,6i \quad \theta_+ = -0,6i$

Таким образом, рассмотренное дифракционное свойство клиновидных структур можно использовать при создании объектов сложной архитектуры с клиновидными (угловыми) элементами поверхности, позволяющими достичь уменьшения радиолокационной заметности таких объектов (уменьшить ЭПР объекта) в условиях моностатического режима локации. Например, корпус и надстройки новейшего «малозаметного» фрегата ВМФ России представляют собой совокупность клиновидных структур.

Список используемых источников

1. *Малюжинец Г.Д.* Интегралы Зоммерфельда и их применение. – Д.: ЛЦНИИ «Румб», 1981. – 31с.
2. *Кравченко В.Ф., Лихачев В.М., Сташкевич А.И.* Об одном асимптотическом методе решения краевой задачи о возбуждении импедансного клина // ДАН СССР. Сер. Математическая физика. – 1989. – Т. 308. – С.329–334.
3. *Лихачев В.М., Сташкевич А.И., Катранов А.Г.* Об одной специальной функции математической теории дифракции // Дифференциальные уравнения с частными производными: межвузовский сб. научных трудов. – Л.: ЛГПИ им. А.И. Герцена, 1989. – С.72–77.
4. *Крячко А.Ф., Лихачев В.М., Смирнов С.Н., Сташкевич А.И.* Теория рассеяния электромагнитных волн в угловых структурах: монография. – СПб.: Наука, 2009. – 194 с.

Б.С. Ставцев

ПРОВЕРКА СПОСОБА СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ДЛЯ РУПОРНОЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В РАДИОЛОКАТОРАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье рассмотрена целесообразность разработанного способа снижения уровня боковых лепестков для сверхширокополосного V-образного рупора, изгиб концов токоведущих шин которого соответствует эллиптической форме. Результаты электродинамического моделирования подтверждают эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: рупорная сверхширокополосная антенна, коэффициент направленности, диаграмма направленности, уровень боковых лепестков.

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в использовании сверхширокополосных (СШП) антенных устройств актуализируется в настоящее время все более частым применением СШП сигналов в радиолокационных системах. Разработки новых СШП антенн часто порождают необходимость улучшения их основных параметров и характеристик. В этой связи актуальной является задача по снижению уровня боковых лепестков (УБЛ) и повышению энергетического потенциала станции. Уровень боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) – один из важных показателей качества любой антенны. Тем более, когда это антенна автосопровождения цели. Здесь возможно ошибочное сопровождение по боковым лепесткам, если те имеют достаточно большой уровень. Известно, что антенны с низким УБЛ более помехоустойчивы, обеспечивают системе большую электромагнитную совместимость с другими радиоэлектронными средствами и высокочастотными устройствами, большую скрытность и, наконец, обеспечивают уменьшение пустой потери энергии на боковое излучение [1]. Снижение УБЛ СШП рупоров, используемых в безэховых камерах (БЭК) радиолокационных измерительных комплексов (РИК), способствует снижению фона камеры, уменьшению прямого просачивания сигнала в антенной системе и, благодаря этому, расширению динамического диапазона измеряемых на РИК сигналов. Кроме того, СШП рупор с низким УБЛ может обеспечить работу какой-либо ретрансляционной, связной или иной спецсистемы, работающей одновременно в нескольких диапазонах частот [2, 6]. В связи с этим, использование таких рупоров позволяет уменьшить массогабаритные показатели антенных устройств, входящих в состав различных систем космического и военно-космического применения.

ОПИСАНИЕ СПОСОБА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе приведены результаты проверки реализуемости способа снижения УБЛ ДН сверхширокополосной рупорной антенны. Принципы, по которым был построен СШП рупор, изложены в работах [3, 4]. Способ снижения УБЛ подробно описан в работе [4]. Данный способ позволил заметно снизить УБЛ в СШП рупоре с нерегулярно расходящимися (по эллиптическому закону) токоведущими шинами, посредством формирования в них прорезей, параллельных плоскости симметрии рупора, построенной перпендикулярно токоведущим шинам, причем прорези отстоят от центрального полоска специальной формы и боковых полосков токоведущих шин. На рис. 1 показаны прорези, сформированные в токо-

ведущих шинах СШП рупора с раскрывом эллиптической формы [4]. Здесь можно видеть центральный полосок шин специальной формы и узкие боковые полосы, от которых начинаются прорезы.

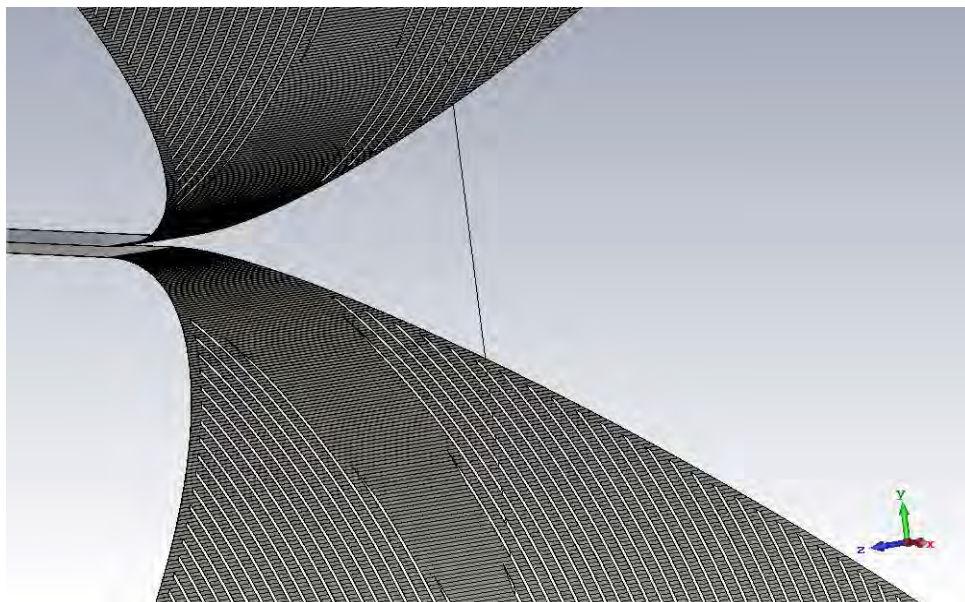


Рис. 1. СШП рупорная антенна с раскрывом эллиптической формы и прорезами в токоведущих шинах

В силу параллельности проделанных прорезей, образовавшиеся в шине полоски (рис.1) также будут параллельны плоскости симметрии рупора с раскрывом эллиптической формы. Токи, наводимые в этих полосках ТЕМ волной, пришедшей из питающего фидера, или электромагнитной волной, пришедшей из свободного пространства, будут протекать в одинаковых направлениях. Ширина полосков выбирается достаточно малой, чтобы их можно было считать проволокой. Тогда каждый «проволочный диполь», образованный парой полосков, зеркально расположенных относительно второй плоскости симметрии (ортогональной к первой плоскости симметрии) рупора, будет формировать свою электромагнитную волну, близкую к цилиндрической. Известно, что у идеальной цилиндрической ЭМВ отсутствует распространение вдоль одной из трех осей ее декартовой системы координат, что в случае СШП рупора с прорезами в токоведущих шинах и приводит к ожидаемому эффекту снижения УБЛ. При этом амплитуда и форма главного лепестка ДН СШП рупора с раскрывом эллиптической формы в большей части рабочего диапазона частот сохраняется достаточно стабильной. Это было продемонстрировано в работе [4]. Однако для проверки работоспособности данного способа необходимо исследовать и другие варианты СШП антенн, один из которых будет рассмотрен далее.

ПРОВЕРКА СПОСОБА СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

Для подтверждения эффекта снижения УБЛ в сверхширокой полосе частот были использованы две V-образные рупорные антенны с гибридным раскрывом – с плоскими (расходящимися под углом в 60 градусов) токоведущими шинами, заканчивающимися эллиптическими загибами. Первая из двух антенн со сплошными токоведущими шинами, как показано на рис. 2, была необходима как исходная, для последующего сравнения результа-

тов. Во второй рупорной антенне с гибридным раскрытием четко видны прорезы в токоведущих шинах (рис. 3), сформированные таким же образом как и в рупоре с раскрытием чисто эллиптической формы, представленном на рис. 1.

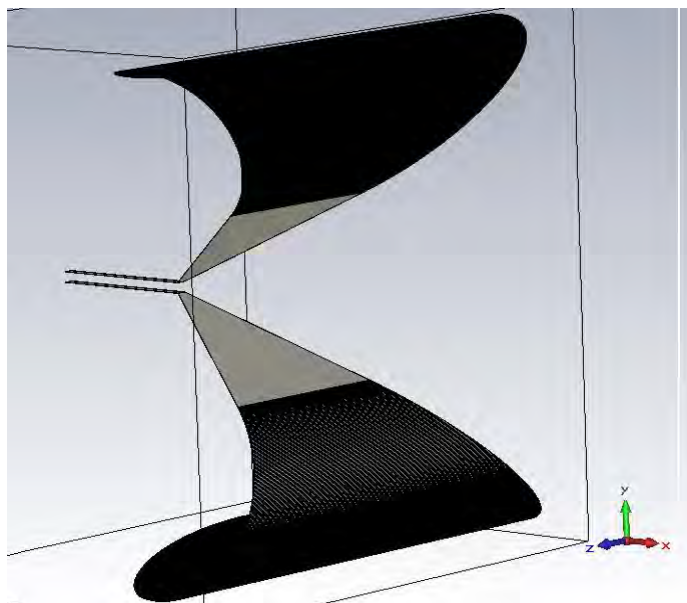


Рис. 2. V-образная антенна с гибридным раскрытием и сплошными шинами

Во второй антенне с гибридным раскрытием (рис. 3), также сделаны прорезы, отступающие от боковых полосков небольшой ширины и центрального полоска специальной формы. В конструкциях обеих антенн V-образной формы заложены принципы построения СШП рупоров, изложенные в [3, 4, 5]. Один из принципов построения – ширина шин в каждом поперечном сечении рупора равна, примерно, расстоянию между шинами. В качестве питающего фидера использован отрезок ленточной полосковой линии, который выполняет роль симметрирующего устройства.

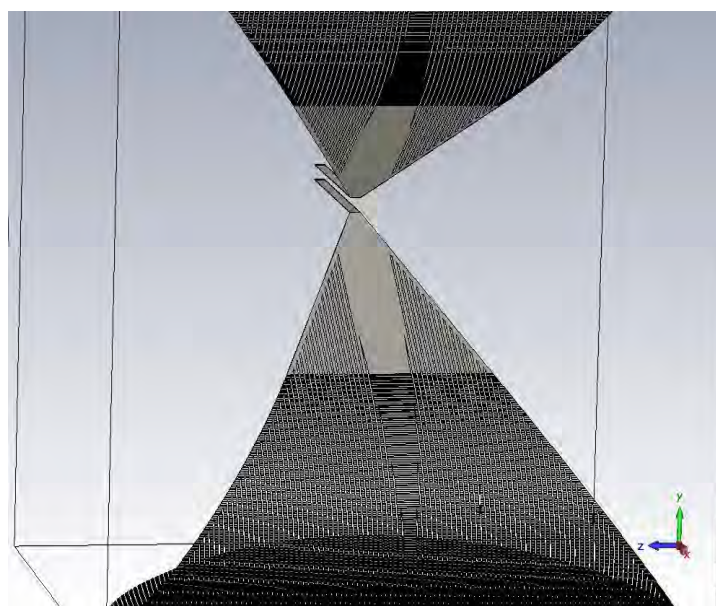


Рис. 3. V-образная антенна с гибридным раскрытием и прорезанными шинами

Исследования проводились в полосе частот от 10 до 50 ГГц в среде программно-алгоритмического комплекса Ansys HFSS. Интересующая полоса частот выбрана исходя из габаритных размеров рупоров, составляющих 35 мм в Е-плоскости. В более низкочастотной области (ниже 10 ГГц) с понижением частоты эти рупора будут проявлять себя как точечные излучатели, что в данном случае не представляет интереса. Следует сказать, что рупор с гибридным раскрывом не является абсолютно совершенным для излучения СШП сигналов, но для проверки реализуемости способа снижения УБЛ он все равно подходит, поскольку нужен сам факт снижения. Подстройка по согласованию с питающим фидером в этом рупоре была просто сведена к небольшому уточнению расстояния между питающими полосками. На рис. 4 показано совмещение отраженных сигналов портов обоих рупоров, причем сплошные кривые принадлежат рупору со сплошными токоведущими шинами, штриховые – рупору с прорезанными шинами, а штрихпунктирной линией изображен сигнал возбуждения (100%), поступающий на питающие ленточные линии. Величина отражений сигналов в обоих портах в точке подачи питания у обоих рупоров чуть меньше 5%. Примерно такие же величины отражений наблюдаются во второй точке перехода от питающей линии к токоведущим шинам рупоров. В третьей точке на временной оси рис. 4 уровень значимых по величине отражений связан с отражениями от конца раскрыва рупоров и составляет около 1,5%.

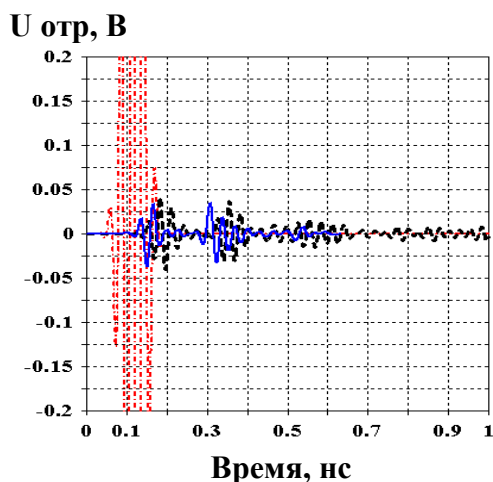


Рис. 4. Сигналы на портах рупоров

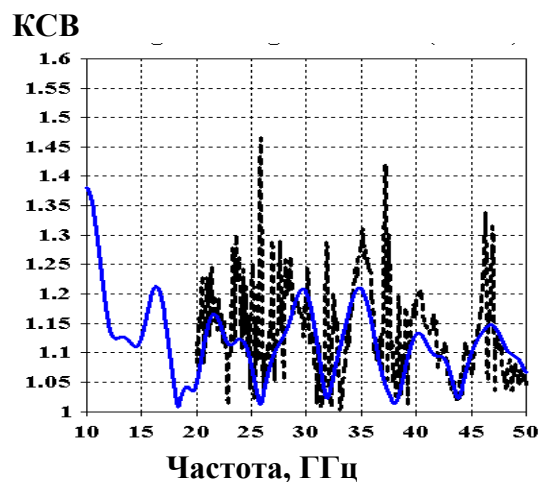


Рис. 5. КСВ рупоров

На рис. 5 представлено совмещение графиков КСВ рупоров в полосе частот от 10 до 50 ГГц. Сплошная линия КСВ – у рупора со сплошными токоведущими шинами, штриховая – у рупора с прорезами. Значения уровней отражений менее 5% (рис. 4) и величины КСВ менее 1,5 в указанной полосе частот достаточно убедительно свидетельствуют о работоспособности рупоров в указанной полосе частот и тем самым подтверждают правомочность проводимых исследований. На следующих рисунках продемонстрированы совмещенные нормированные ДН рупоров: у рупора с прорезами – штриховой линией, у рупора без прорезей – сплошной линией. Исследования были проведены в достаточно широкой полосе частот, чтобы показать эффективность работы способа. В низкочастотной части диапазона исследуемых частот достаточно заметно проявлялось околорезонансное взаимодействие рупоров с ЭМВ, поскольку размеры рупоров на частотах от 10 до 15 ГГц еще соизмеримы с длинами волн. Как итог, это взаимодействие сказалось на снижении уровня главного лепестка в ДН на этих частотах. Но уже начиная с частоты 18 ГГц можно заметить, что уровни боковых (в том числе и задних) лепестков практически на всех остальных частотах исследования на ДН рупора с прорезами заметно снизились, что и в этом случае подтверждает действенность способа снижения УБЛ, описанного в [4].

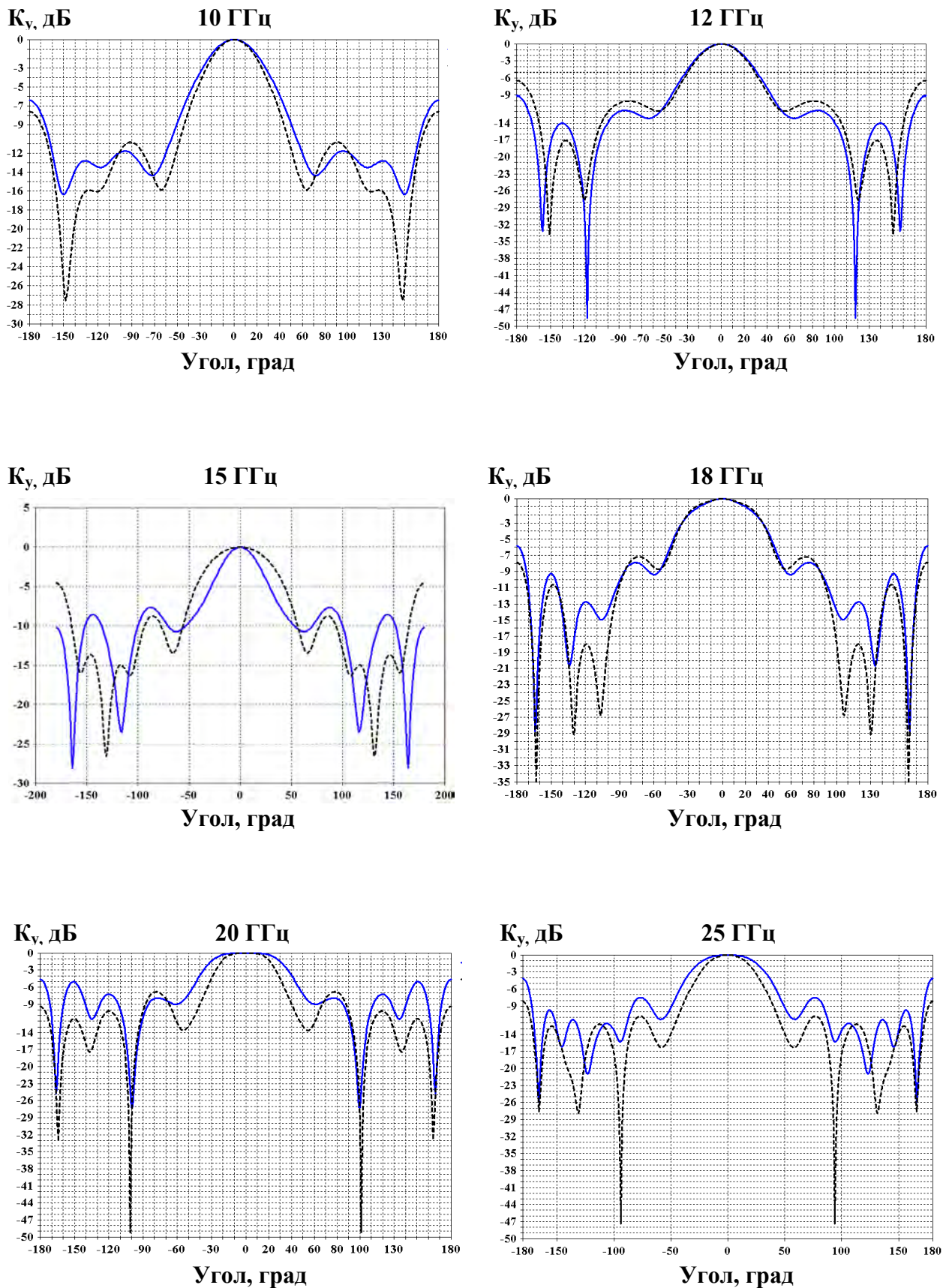


Рис. 6. Сравнение ДН (дБ) рупоров в ϕ -плоскости при угле $\theta = 90^\circ$ на частотах 10, 12, 15, 18, 20, 25, 34, 37,5, 40, 45 и 50 ГГц (начало)

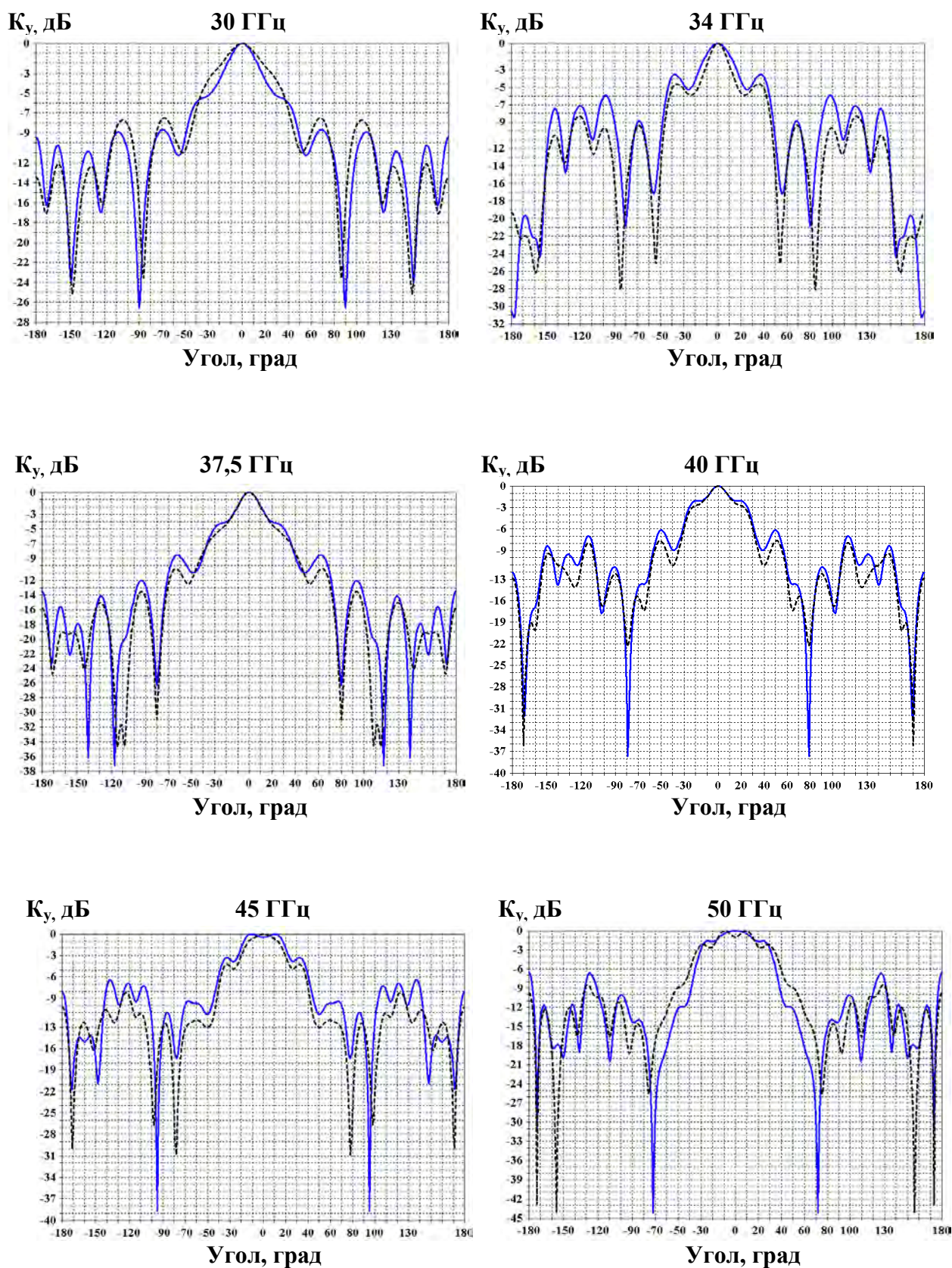


Рис. 6. Сравнение ДН (дБ) рупоров в ϕ -плоскости при угле $\theta=90^\circ$ на частотах 10, 12, 15, 18, 20, 25, 34, 37,5, 40, 45 и 50 ГГц (окончание)

Как уже было сказано в начале работы, рупор с гибридным раскрывом не претендует на роль идеальной сверхширокополосной антенны, а выбран с целью демонстрации действенности способа снижения УБЛ на других типах рупоров, отличающихся и формой, и размером. Возможно поэтому, главный лепесток у исследуемого рупора в небольшой степени нестабилен по форме и амплитуде, но эффект снижения УБЛ после прорезывания токоведущих шин в целом на боковых лепестках и на заднем лепестке достаточно заметен. Первый боковой лепесток снизился на 4 дБ на частоте 25 ГГц и далее, с повышением частоты, снижение замедляется и доходит до 1 дБ на частоте 50 ГГц (рис.6). Превышение уровня первого бокового лепестка у ДН рупора с прорезями на 1 дБ на частоте 20 ГГц и на 1,5 дБ на частоте 30 ГГц можно объяснить либо несовершенством, либо непригодностью гибридных раскрывов для рупоров, излучающих СШП сигналы. Это превышение стало результатом негативных резонансных явлений, связанных с формой раскрыва. Но даже, несмотря на это, с повышением частоты уровень заднего лепестка снижается на 2–4 дБ, а уровень основного лепестка либо остается стабильным, либо превышает уровень до прорезывания шин, что говорит о повышении КПД антенны, а значит и о повышении энергетического потенциала системы, куда входила бы антенна. Таким образом, эффект снижения УБЛ в рупорной антенне с гибридным раскрывом после формирования в нем прорезей, сделанных по рекомендациям проверяемого способа [4], отчетливо наблюдается и заметнее проявляется с ростом частоты исследований, а на более высоких рабочих частотах может привести даже к росту уровня главного лепестка, с одновременным подавлением уровней, как первых боковых, так и заднего лепестков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Положительные результаты проверки действенности способа снижения УБЛ, примененного в данной работе к виртуальной модели рупорной антенны, отличающейся от антенны, приведенной в работе [4] типом, размерами и формой, подтверждают заметное снижение УБЛ в ДН СШП рупорной антенны, после продельывания в токоведущих шинах прорезей в соответствии с описанием способа. При дальнейших проверках работоспособности способа необходимо проверить влияние экранного кожуха на исследуемые рупора, а также продолжить исследования других рупоров и антенн, где способ может быть применен. Результаты применения способа снижения УБЛ, полученные в настоящей работе, показывают возможность реального снижения УБЛ СШП рупорных антенн, используемых в радиолокаторах военного назначения и приоткрывают перспективу для проектирования широкополосных антенных решеток.

Список используемых источников

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко, В.С. Филиппов и др.; под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
2. *Иммореев И.Я.* Сверхширокополосные радары: новые возможности, необычные проблемы, системные особенности // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. – 1998. – №4. – С.25–55.
3. *Ставцев Б.С.* СШП ТЕМ рупор с перфорированными токоведущими шинами // VI Всероссийские Армандовские чтения «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике»: материалы VI Всероссийской научной конференции (Муром, 29 мая – 2 июня 2016 г.). – URL: nivlgu.ru.>conf/armand2016/rmdzs-2016/vvedenie/html (дата обращения: 25.06.19). – С. 231–238.

4. *Ставцев Б.С.* Способ снижения уровня боковых лепестков диаграммы направленности рупорной сверхширокополосной антенны // Труды Военной космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 657. – С.131–140.

5. *Ашихмин А.В., Муратов А.В., Дуров В.П.* Использование модифицированных ТЕМ рупоров и щелевых антенн бегущей волны как альтернативы волноводно-линзовым рупорам в портативной аппаратуре поиска радиозакладок // Информация и безопасность. – 2005. – № 1. – С. 154–160.

6. *Анцев Г.В., Кардо-Сысоев А.Ф., Сарычев В.А., Французов А.Д.* Антенны для сверхкороткоимпульсных радиосистем // Сб. тр. VIII-й международной НТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2002. – Т. 2. – С. 1555–1564.

В.Л. Якимов,
кандидат техн. наук, доцент

ПЛАНИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ АВТОНОМНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

В статье рассмотрен модельный подход к решению задачи обработки телеметрической информации и планированию операций информационно-телеметрического обеспечения управления космическими аппаратами с высоким уровнем автономности, обеспечивающий заданный уровень надежности их функционирования. Показана необходимость оценивания вектора состояния бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов через решение задачи нелинейной фильтрации в негауссовских шумах и помехах. Предложена логическая схема выбора интервалов автономного функционирования космических аппаратов с высоким уровнем автономности.

Ключевые слова: космический аппарат, диагностирование технического состояния, нелинейная динамическая система.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня автономности функционирования – современная тенденция развития космических аппаратов (КА). Понятие автономности можно сформулировать как способность КА и его бортового комплекса управления (БКУ) к самостоятельному функционированию и выполнению полетных операций без информационного взаимодействия с наземным комплексом управления (НКУ). При этом вводится понятие интервала автономного функционирования (ИАФ), как интервала времени, в течение которого КА может функционировать автономно, без информационного взаимодействия с НКУ [1]. Для КА с высоким уровнем автономности является характерным планово-периодический характер проведения операций информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) в ходе сеансов управления. Периодичность контроля технического состояния (ТС) бортовой аппаратуры (БА) таких КА определяется технологическими циклами управления и зависит от надежности функционирования БА, а также от возможностей бортовых средств диагностирования и восстановления работоспособности БА [2].

Задачи контроля ТС и диагностирования БА КА относятся к классу обратных задач и характеризуются неопределенностью получаемых оценок ТС. При реализации на борту автономных КА данные задачи решаются в классической постановке, так как бортовая подсистема диагностирования имеет возможность непрерывно контролировать значения телеметрируемых параметров (ТМП) БА в отсутствии аномальных шумов и помех, обусловленных передачей телеметрической информации (ТМИ) по радиоканалу.

Задача диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности существенно усложняется именно для наземного сегмента системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) при отработке сложных нештатных ситуаций (НС) и, так называемых, «тяжелых» отказов, что определяется следующими причинами: ограниченными объемами передаваемой в НКУ ТМИ о функционировании БА, малым количеством прецедентов по сложным НС, нелинейным характером анализируемых процессов и, что является важным именно для автономных КА, влиянием ИАФ на нестационарный характер временных рядов телеметрируемых параметров (ТМП) и надежность функционирования КА [1]. С ростом

ИАФ неопределенность получаемой оценки ТС КА увеличивается в результате: деградации и дрейфа параметров и характеристик БА вследствие воздействия внешних факторов космического пространства; износа и старения элементов БА; негативного развития на борту КА нештатных ситуаций (НС), не учтенных в базе данных бортового диагностического комплекса; эмерджентности ТМП и т. п. В случае небольших ИАФ влияние рассмотренных процессов можно приближенно рассматривать как линейное и незначительное, но с увеличением ИАФ, особенно в частично работоспособном состоянии КА, пренебрегать данными факторами и их нелинейностью нельзя, так как это может привести к ошибкам диагностирования БА и уменьшению надежности функционирования сложных КА в целом. Снижение негативного влияния перечисленных факторов на значения временных рядов ТМП и, тем самым, повышение надежности функционирования КА с высоким уровнем автономности, может быть достигнуто использованием адекватных методов диагностирования БА в наземном сегменте СИТО, а также планированием операций ИТО и проактивным управлением периодичностью проведения операций контроля ТС и диагностирования БА на этапе летной эксплуатации.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В наземном сегменте СИТО осуществляется углубленный анализ ТС БА КА, выявляются негативные изменения и реализуются соответствующие коррекции в работе БА для обеспечения заданной надежности функционирования КА. Наиболее эффективным подходом для реализации углубленного анализа ТС БА, в сравнении с другими, основанными на опыте и знаниях, является модельный подход [3]. Использование модельного подхода позволяет распознавать сложные НС в БА, что особенно важно при диагностировании КА в наземном сегменте СИТО [4]. Создаваемый при этом многомодельный комплекс может быть использован не только для диагностирования БА, но и для решения задач повышения достоверности телеизмерений, оценивания и прогнозирования надежности функционирования БА. Поведение БА КА с учетом процессов деградации ее параметров и характеристик, а также влияния внешних факторов космического пространства, опишем следующими уравнениями состояния и наблюдения [5, 6]:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_k &= \Psi(\mathbf{Q}_{k-1}, \mathbf{F}_k, \mathbf{S}_k), \\ \mathbf{X}_k &= \mathbf{H}(\mathbf{Q}_k, \mathbf{V}_k), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{Q}_k = [q_{1,k}, \dots, q_{m,k}]^T$ – вектор состояния БА;
 $\mathbf{X}_k = [x_{1,k}, \dots, x_{m,k}]^T$ – вектор значений ТМП БА;
 $\mathbf{S}_k = [s_{1,k}, \dots, s_{m,k}]^T$ – вектор возмущающих воздействий, определяемый адекватностью модели Ψ анализируемым процессам;
 $\mathbf{V}_k = [v_{1,k}, \dots, v_{m,k}]^T$ – вектор шумов измерений и помех в ТМП БА;
 $\mathbf{F}_k = [f_{1,k}, \dots, f_{m,k}]^T$ – вектор, характеризующий неисправности в БА, в том числе штатную деградацию ее параметров и характеристик;
 k – номер дискретного отсчета времени, $k=1 \dots T_n$;
 T_n – длина полученных временных реализаций ТМП в дискретных отсчетах времени;
 m – количество анализируемых ТМП БА.

Под параметрами состояния БА, являющимися элементами вектора состояния \mathbf{Q}_k , будем понимать обработанные (отфильтрованные) значения ТМП БА, очищенные от шумов и помех. При отсутствии НС, рассмотренных в базе данных КА, изменения вектора состояния будут определяться изменениями вектора \mathbf{F}_k в результате штатной деградации параметров и характеристик БА КА. Ситуации штатного функционирования и типовые НС, подлежащие распознаванию, будем считать рассмотренными ситуациями (РС) в базе данных КА. Для каждой РС будем осуществлять синтез моделей $\{\mathbf{F}_{m,i}\}$ на основе временных рядов ТМП, по-

лученных по результатам испытаний БА однотипных КА с привлечением экспертной информации. При этом процедуре распознавания РС будет предшествовать оценка вектора состояния $\hat{\mathbf{Q}}_k$ на основе известных моделей РС $\{\mathbf{F}_{m,i}\}$, где $i=1 \dots N$ – номер РС в базе данных КА, N – количество РС в базе данных КА.

Проанализируем характер функционалов Ψ и \mathbf{H} и уточним общий вид уравнений (1). Формализуем процессы обработки ТМИ, диагностирования БА и управления периодичностью контроля КА с высоким уровнем автономности как операции ИТО, направленные на обеспечение заданного показателя надежности функционирования КА. Определим порядок выбора ИАФ КА с высоким уровнем автономности на этапе летной эксплуатации.

АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ АВТОНОМНОСТИ

Преобладающим видом отказов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются постепенные отказы, возникающие в результате деградиационных процессов в радиоэлементах и характеризующиеся постепенным их изменением с выходом за допустимые границы значений одного или нескольких ТМП. Анализ РЭА показывает, что дрейф изменений ее параметров представляет собой аддитивный нестационарный случайный процесс, имеющий детерминированную $\bar{z}(t)$ и случайную $\delta(t)$ составляющие: $z(t) = \bar{z}(t) + \delta(t)$ (табл. 1) [7]. Причиной деградации параметров и характеристик БА могут быть различные факторы: повреждения p - n -переходов полупроводниковых приборов и фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей вследствие воздействия космической радиации; ухудшение механических свойств элементов БА вследствие испарения материалов конструкции КА в вакууме (сублимации металлов); изменение характеристик аккумуляторной батареи в процессе многократных зарядов/разрядов и т. п. Наиболее распространенными моделями детерминированной составляющей являются: линейная, экспоненциальная, логарифмическая, степенная (табл. 1).

Таблица 1

Обобщенные модели дрейфа параметров РЭА

Модели детерминированной составляющей		Модели дрейфа параметров
Линейная	$\bar{z}(t) = a_0 - a_1 t$	$z(t) = z_{np} - a_1 (t - T_{np})$
Экспоненциальная	$\bar{z}(t) = a_0 e^{-(a_1 t / a_0)}$	$z(t) = z_{np} e^{-\frac{a_1 (t - T_{np})}{a_0}}$
Логарифмическая	$\bar{z}(t) = a_0 - a_0 \ln \left(1 - \frac{a_1 t}{a_0} \right)$	$z(t) = z_{np} - a_0 \ln \left(1 - \frac{a_1 (t - T_{np})}{a_0} \right)$
Степенная	$\bar{z}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$	$z(t) = z_{np} + 2\sqrt{a_2} \sqrt{z_{np} - a_0 + \frac{a_1^2}{4a_2} (t - T_{np})} + a_2 (t - T_{np})^2$

В работе [7] для выбранных функций найдены аналитические зависимости (модели дрейфа), связывающие между собой время достижения параметром предельного состояния T_{np} , текущее время t , значение параметра в текущий момент времени $z(t)$, а также предельно до-

пустимое значение параметра $z_{\text{пр}}$. В данных моделях: a_p – эмпирические коэффициенты, p – номер коэффициента. В табл. 2 представлены практические примеры подобных ситуаций. Далее для их описания используются степенные полиномы.

Таблица 2

**Примеры деградации параметров и характеристик БА КА
вследствие износа и старения**

ТМП, характеристика БА	Качественное описание процесса	Модель изменения ТМП
Напряжение U в контрольных точках схемы бортового передающего устройства СВЧ-диапазона	Изменение U на протяжении срока активного существования (САС) КА	$U(t) \sim t$
Температура T внутри гермоконтейнера КА	Деградация T на протяжении САС КА	$T(t) \sim t^2$
Относительная погрешность Δ_c суточного дрейфа частоты в бортовом синхронизирующем устройстве (БСУ)	Деградация характеристики Δ_c во времени в течение суток	$\Delta_c(t) \sim t^4$
Ток солнечной батареи (СБ) $I_{\text{сб}}$	Деградация параметра $I_{\text{сб}}$ на протяжении САС КА	$I_{\text{сб}}(t) \sim t$
Размеры уплотнений клапанов и переходных устройств системы обеспечения теплового режима (СОТР)	Изменение свойств материала под действием повторных переменных напряжений	$z(t) \sim t^n$
Ток утечки интегральных микросхем КМОП типа $I_{\text{ут}}$ [8]	Изменение $I_{\text{ут}}$ на протяжении САС КА	$I_{\text{ут}}(t) \sim \ln(t+1)$

Представленные модели могут отличаться у разных КА. При этом, если для некоторых характеристик в пределах ИАФ деградация практически отсутствует (мощность СВЧ передатчика) или является незначительной (ток СБ), то для некоторой БА может быть существенной (точность шкалы времени БСУ). Важной причиной увеличения интенсивности деградационных процессов в БА и нелинейного изменения ее ТМП и характеристик является воздействие внешних факторов космического пространства, что особенно актуально для бесконтейнерных КА, а также КА в частично работоспособном состоянии (табл. 3).

Рассмотренные примеры демонстрируют нелинейный характер воздействия внешних факторов космического пространства на компоненты вектора состояния БА КА. При этом является очевидным, что в частично-работоспособном состоянии влияние внешней среды на деградацию характеристик БА КА в пределах ИАФ может быть действительно актуальным.

Источником негативных нелинейных изменений ТМП также могут стать нелинейные преобразования телеметрических сигналов: в датчиково-преобразующей аппаратуре – вследствие нелинейности их тарировочных характеристик; в приемно-передающем тракте радиотелеметрической системы – вследствие нелинейности проходных характеристик; в телеметрических согласующих устройствах – вследствие неверного выбора границ телеметрической шкалы и учета аномальных изменений ТМП при возникновении НС. Первая и вторая причины устраняются на этапе первичной обработки с использованием тарировочных и калибровочных характеристик датчиков. При этом остаточное нелинейное влияние на ТМП определяется используемым числом уровней аппроксимации соответствующих характеристик и степенью их нелинейности.

Источником позитивных нелинейных изменений во временных рядах ТМП, влияющих на характер функционала \mathbf{H} в уравнении (1), могут стать следующие преобразования ТМП: двустороннее амплитудное ограничение ТМП, позволяющее увеличить отношения «сигнал/помеха», но приводящее к нарушению гауссовского характера помехи; формирование обобщенных параметров ТС БА с целью упрощения анализа ТС сложных функциональных узлов; обработка нескольких зависимых ТМП на основе нелинейных регрессионных моделей с целью повышения точности измерений и т. п. [9].

Таблица 3

Примеры воздействия на параметры и состояние БА КА внешних факторов космического пространства

ТМП, характеристика БА	Качественное описание процесса	Модель изменения ТМП
Максимальная погрешность Δ бортовой шкалы времени	Зависимость Δ во времени t при скачкообразном воздействии температуры T	$\Delta(t, T) \sim t^5$
	Зависимость Δ во времени t при скачкообразном воздействии давления P	$\Delta(t, P) \sim t^5$
	Зависимость Δ во времени t при скачкообразном воздействии магнитного поля B	$\Delta(t, B) \sim t^5$
Относительная погрешность Δ_f воспроизводимости частоты в БСУ от включения к включению	Зависимость Δ_f при включении аппаратуры от номера операции b	$\Delta_f(t) \sim b^5$
Максимальный ток $I_{m,AB}$ аккумуляторной батареи (АБ)	Зависимость $I_{m,AB}$ при воздействии потока радиации с интенсивностью Φ	$I_{m,AB}(\Phi) \sim \Phi^3$
Ток СБ I_{CB}	Зависимость I_{CB} при воздействии температуры T	$I_{CB}(T) \sim T^3$
Напряжение бортовой сети малого КА U_{BC} с магнитогравитационной системой ориентации (МГСО)	Временные тренды, обусловленные влиянием ориентации малого КА на Солнце и Землю	$U_{BC}(t) \sim \cos(a_0 / T_B)$, T_B – длительность витка КА

Результат телеизмерений \mathbf{z}_k можно представить следующим выражением [10]:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{z}_{u,k} + \boldsymbol{\varepsilon}_{m,k} + \boldsymbol{\varepsilon}_{n,k} + \boldsymbol{\varepsilon}_{a,k},$$

где $\mathbf{z}_{u,k}$ – вектор истинных значений ТМП;

$\boldsymbol{\varepsilon}_{m,k}$ – вектор систематических погрешностей значений ТМП;

$\boldsymbol{\varepsilon}_{n,k}$ – вектор нормальных составляющих случайных погрешностей значений ТМП;

$\boldsymbol{\varepsilon}_{a,k}$ – вектор аномальных составляющих случайных погрешностей значений ТМП.

В табл. 4 представлены результаты проведенного анализа погрешностей телеизмерений, указана их принадлежность векторам \mathbf{S}_k и \mathbf{V}_k из уравнения (1). Вектор \mathbf{F}_k можно представить в виде двух компонент: информационно-важной низкочастотной $\mathbf{F}_{=,k}$, характеризующей НС, и случайной высокочастотной $\mathbf{F}_{\sim,k}$.

Таблица 4

Анализ компонентов векторов возмущений S_k и ошибок измерений V_k

Тип погрешности		Причины возникновения	Описание	Принадлежность векторам S_k, V_k	Характер возмущений
Систематические $\epsilon_{m,k}$		Нелинейность градуировочной характеристики ТМП	$\epsilon_{gx,k}$ – вектор погрешностей, вносимых нелинейностью градуировочных характеристик ТМП	S_k	Негауссовский
		Недостаточная адекватность моделей переходов между состояниями БА и моделей РС	$dQ_{m,k}$ – вектор погрешностей модели переходов между состояниями Q_k		
			$dF_{=,k}$ – вектор систематических погрешностей описания векторов $F_{=,k}$ моделями $\{F_{m,i}\}$		
Случайные	Аномальные $\epsilon_{a,k}$	НС на борту КА	$F_{\sim,k}$ – вектор случайных погрешностей описания векторов F_k векторами $F_{=,k}$	V_k	Негауссовский
		Импульсные помехи в радиоканале	$\epsilon_{п,k}$ – вектор случайных погрешностей, обусловленных аномальными помехами в радиоканале		
	Нормальные $\epsilon_{н,k}$	Флуктуации в тракте формирования, передачи и приема телеметрических сигналов	$\epsilon_{н,k}$ – вектор шумов телеизмерений	V_k	Гауссовский

Нелинейный характер моделей изменения ТМП и, как следствие, функционалов Ψ и H , а также характер действующих во временных рядах ТМП возмущений и шумов, обуславливает необходимость оценивания вектора состояния БА Q_k , в общем случае, с использованием методов нелинейной фильтрации ТМП в присутствии негауссовских шумов и помех.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ И ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ АВТОНОМНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНОГО ПОДХОДА

Оценка вектора состояния БА КА с высоким уровнем автономности осуществляется на основе ограниченного объема ТМИ, получаемой с борта КА при проведении l -го сеанса управления. С учетом результатов проведенного анализа для КА с высоким уровнем автономности запишем стохастические уравнения (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q_{l,k} &= \Psi_1(Q_{l,k-1}, k) + \Psi_2(F_{=,l,k}, T_A, k) + S_k, \\ X_{l,k} &= H(Q_{l,k}) + V_{l,k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где Ψ_1 – функционал, характеризующий детерминированное изменение вектора состояния БА КА $Q_{l,k}$ от НКУ и БКУ;

Ψ_2 – функционал, характеризующий негативное влияние на вектор состояния $Q_{l,k}$ вектора $F_{=,l,k}$.

На этапе первичной обработки ТМИ решается задача оценивания вектора состояния $\mathbf{Q}_{l,k}$. Существует общее решение данной задачи в виде последовательной двухэтапной процедуры «предсказание-коррекция» на основе уравнений Колмогорова-Чепмена и правила Байеса, однако точные решения получены лишь для ряда частных случаев [11]. В реальных задачах используются квазиоптимальные методы нелинейной фильтрации в негауссовских шумах и помехах, в соответствии с которыми в каждый k -й момент времени на основе вектора состояния в предыдущий $k-1$ момент времени $\hat{\mathbf{Q}}_{l,k-1}$, текущего вектора наблюдения $\mathbf{X}_{l,k}$, для каждого вектора модельной РС $\mathbf{F}_{m,i}$ оценивается значение вектора состояния $\hat{\mathbf{Q}}_{l,i,k}(\mathbf{F}_{m,i}) = \Theta(\hat{\mathbf{Q}}_{l,i,k-1}, \mathbf{X}_{l,k}, \mathbf{U}_{l,i,k}, \mathbf{F}_{m,i}, \mathbf{S}_{l,i,k}, \mathbf{V}_{l,i,k})$, где Θ – оператор нелинейной фильтрации.

На основе полученных оценок $\hat{\mathbf{Q}}_{l,i,k}$ и оценок вектора состояния в отсутствии шумов и помех $\mathbf{Q}_{l,i,k}(\mathbf{F}_{m,i})$ для каждой модельной РС $\mathbf{F}_{m,i}$, определяются значения отфильтрованного $z_{l,i,k}$ и модельного $z_{m,l,i,k}$ временного ряда ТМП, абсолютные погрешности фильтрации в k -й момент времени $\Delta_{\phi,l,i,k}$, математическое ожидание погрешности фильтрации $\mu_{\phi,l,i}$ и средне-квадратическая погрешность фильтрации $E_{\phi,l,i}$:

$$\begin{aligned}\Delta_{\phi,l,i,k}(\mathbf{F}_{m,i}) &= |z_{l,i,k} - z_{m,l,i,k}|, \\ \mu_{\phi,l,i}(\mathbf{F}_{m,i}) &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (z_{l,i,k} - z_{m,l,i,k}), \\ E_{\phi,l,i}(\mathbf{F}_{m,i}) &= \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (z_{l,i,k} - z_{m,l,i,k})^2},\end{aligned}\quad (3)$$

где M – количество дискретных отсчетов анализируемых реализаций ТМП.

Далее, предполагая нормальный закон распределения погрешности фильтрации ТМП, определяем вероятность отнесения анализируемой ситуации по каждому ТМП к каждой i -й РС в базе данных КА:

$$P_{\text{по},l,i,q}(\mathbf{F}_{m,i}) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Phi \left(\frac{\Delta_{\phi,l,i,k}(\mathbf{F}_{m,i}) - \mu_{\phi,l,i}(\mathbf{F}_{m,i})}{E_{\phi,l,i}(\mathbf{F}_{m,i})} \right), \quad (4)$$

где Φ – функция Лапласа;

q – номер анализируемого ТМП, $q=1 \dots m$.

На этапе вторичной обработки определяем вероятность отнесения текущей ситуации к каждой возможной i -й РС в базе данных КА по всем анализируемым ТМП

$$P_{\text{во},l,i}(\mathbf{F}_{m,i}) = \prod_{q=1}^m P_{\text{по},l,i,q}(\mathbf{F}_{m,i}). \quad (5)$$

При этом может быть использована дополнительная априорная информация о функционировании БА и взаимосвязях между моделями РС, позволяющая скорректировать распределение вероятностей (5). Данную коррекцию можно условно отобразить через набор вероятностей $R_{l,i}(\mathbf{F}_{m,1}, \dots, \mathbf{F}_{m,N})$, характеризующих возможности алгоритмического аппарата вторичной обработки ТМИ. Допуская, что в каждый момент времени может быть только одна РС (РС являются независимыми) и, осуществив нормировку полученных вероятностей, получаем значение вероятности отнесения текущей ситуации к множеству i -х РС из базы данных КА:

$$P'_{\text{во},l,i}(\mathbf{F}_{m,i}, \mathbf{F}_{m,1}, \dots, \mathbf{F}_{m,N}, R_{l,i}) = \frac{P_{\text{во},l,i}(\mathbf{F}_{m,i}) R_{l,i}(\mathbf{F}_{m,1}, \dots, \mathbf{F}_{m,N})}{\sum_{i=1}^N P_{\text{во},l,i}(\mathbf{F}_{m,i}, \mathbf{F}_{m,1}, \dots, \mathbf{F}_{m,N})}. \quad (6)$$

На основе полной группы возможных в ходе принятия решения событий, определяем апостериорную вероятность принятия решения в пользу каждой j -й РС в наземном сегменте СИТО:

$$P_{\text{во},l,j}^*(F_{=,l}, F_{M,1}, \dots, F_{M,N}, R_{l,j}) = 1 - \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq j}}^N P_{\text{во},l,i}'(F_{=,l}, F_{M,1}, \dots, F_{M,N}, R_{l,i}) \prod_{\substack{r=1, \\ r \neq i}}^N (1 - P_{\text{во},l,r}'(F_{=,l}, F_{M,1}, \dots, F_{M,N}, R_{l,r})). \quad (7)$$

На основании критерия максимума апостериорной вероятности определяем текущую РС $F_{=,l}^*$ и достоверность диагностирования БА $D_{2,l}$ в наземном сегменте СИТО:

$$D_{2,l}(F_{=,l}, F_{M,1}, \dots, F_{M,N}, R_{l,i}) = \max(P_{\text{во},l,i}^*(F_{=,l}, F_{M,1}, \dots, F_{M,N}, R_{l,i})), D_{2,l} \geq D_{\text{зад}}, \\ F_{=,l}^* = \operatorname{argmax}(D_{2,l}(F_{=,l}, F_{M,1}, \dots, F_{M,N}, R_{l,i})). \quad (8)$$

Аналогичным образом в наземном сегменте СИТО определяем достоверность диагностирования БА с использованием алгоритмического аппарата бортового сегмента СИТО – $D_{1,l}$, $D_{\text{зад}} < D_{1,l} < D_{2,l}$, что позволяет не только проверить правильность работы БКУ при отработке РС, но и является необходимым для дальнейшей оценки надежности функционирования КА.

В работе [12] приведены зависимости, связывающие вероятность безотказной работы БА и достоверность диагностирования БА при парировании НС на борту КА в случае простейшего потока отказов. Для автономных КА эти зависимости сложнее вследствие того, что диагностирование БА КА осуществляется как с использованием средств бортового, так и наземного сегментов СИТО, а также вследствие зависимости вероятности безотказной работы автономных КА от величины ИАФ. В работе [1] на основе статистической информации об отказах на борту КА с высоким уровнем автономности и дискретно-событийного подхода получена имитационная модель процессов диагностирования БА, позволяющая оценить вероятность безотказной работы КА $\hat{P}_{A,l}$ через достоверности $D_{1,l}$ и $D_{2,l}$, а также текущее значение ИАФ $T_{A,l}$. Используя набор значений $\hat{P}_{A,l}, \hat{P}_{A,l-1}, \dots, \hat{P}_{A,l-N_T+1}$, полученных в ходе текущего и предыдущих (N_T-1) сеансов управления, будем прогнозировать вероятность безотказной работы КА на заданное время упреждения T . На основе заданного значения вероятности безотказной работы $P_{A,\text{зад}}$ определим требуемый ИАФ $\hat{T}_{A,l+1}$ и время проведения очередного сеанса управления с КА $t_{y,l+1}$:

$$\hat{P}_{A,l} = \Omega(D_{1,l}, D_{2,l}, T_{A,l}), \hat{P}_{A,l+1}(T) = \Xi(\hat{P}_{A,l}, \hat{P}_{A,l-1}, \dots, \hat{P}_{A,l-N_T+1}), \\ \hat{T}_{A,l+1} = T \mid \hat{P}_{A,l+1}(T) = P_{A,\text{зад}}, t_{y,l+1} = t_{y,l} + \hat{T}_{A,l+1}. \quad (9)$$

Выражения (2–9) отражают основные математические преобразования в ходе определения требуемого ИАФ и периодичности проведения операций контроля автономных КА средствами наземного сегмента СИТО.

Основная цель задачи диагностирования БА – поддержание заданной надежности функционирования КА с высоким уровнем автономности на этапе летной эксплуатации может быть достигнута как использованием адекватных методов диагностирования в наземном сегменте СИТО, удовлетворяющих условию (8), так и реализацией проактивного управления периодичностью контроля КА, удовлетворяющего условию (9).

ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ВЫБОРА ИНТЕРВАЛОВ АВТОНОМНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ АВТОНОМНОСТИ НА ЭТАПЕ ЛЕТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

На основе полученного формализованного описания процесса обработки ТМИ и правил, определяющих его организацию в наземном сегменте СИТО, можно синтезировать логиче-

скую схему выбора ИАФ (определения периодичности контроля КА), обеспечивающую заданную надежность функционирования КА с высоким уровнем автономности на этапе летной эксплуатации (рис. 1).

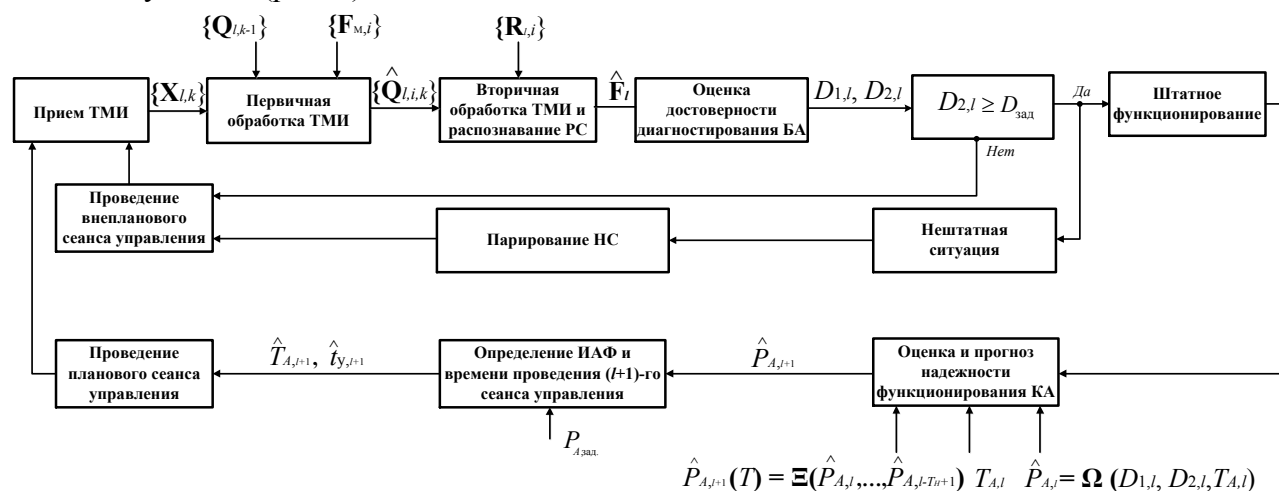


Рис. 1. Логическая схема выбора ИАФ КА с высоким уровнем автономности в наземном сегменте СИТО

При проведении l -го сеанса управления с КА осуществляется прием массива ТМИ в виде набора зашумленных векторов наблюдения $\{X_{l,k}\}$. В каждый k -й момент времени на основе вектора состояния в предыдущий $(k-1)$ момент времени $\hat{Q}_{l,k-1}$, вектора наблюдения $X_{l,k}$, для каждого вектора модельной НС $\{F_{m,i}\}$ оцениваем значение вектора состояния $\hat{Q}_{l,i,k}$. Таким образом, в результате первичной обработки всех векторов $\{X_{l,k}\}$ получаем отфильтрованные временные ряды ТМП. На этапе вторичной обработки, используя полученные оценки $\hat{Q}_{l,i,k}$, множество корректирующих вероятностей $\{R_{l,i}\}$, а также выражения (3–7), получаем оценку текущей РС $\hat{F}_{l,k}$. Оценив достоверности принятого решения с использованием алгоритмического аппарата бортового $D_{1,l}$ и наземного $D_{2,l}$ сегментов и сравнив их с пороговым значением $D_{зад}$, принимаем решение о достаточном количестве ТМИ и полученных значениях достоверностей диагностирования, либо о необходимости проведения внепланового сеанса управления для получения дополнительной ТМИ. При обнаружении НС парируем НС и проводим внеплановый сеанс управления с КА, в ходе которого осуществляем контрольный прием ТМИ с целью оценивания ТС БА. Если значение достоверности $D_{2,l}$ имеет высокое значение, и распознанная ситуация характеризует штатное функционирование БА, то оцениваем надежность функционирования КА. В случае штатного функционирования КА на основе полученной оценки вероятности безотказной работы $\hat{P}_{A,l+1}$ на интервале упреждения прогноза T и требуемого значения $P_{A,зад}$, определяем величину ИАФ $\hat{T}_{A,l+1}$ и время проведения следующего сеанса управления $\hat{t}_{y,l+1}$.

Надежность функционирования КА с высоким уровнем автономности можно повысить: декомпозицией уравнений (2) на множество уравнений, описывающих изменение вектора состояния и наблюдения отдельных функциональных узлов с последующим агрегированием полученной информации; повышением достоверности моделей РС $\{F_{m,i}\}$; совершенствованием подходов к оцениванию первичных вероятностей отнесения текущих реализаций ТМП к множеству РС из базы данных КА $P_{по,l,i,q}$; использованием оптимальных методов линейной и

нелинейной фильтрации ТМП, а также их адаптивным выбором на тех или иных участках временных рядов ТМП; развитием методов вторичной обработки ТМИ и, тем самым, повышением адекватности множества корректирующих вероятностей $\{R_{l,i}\}$; повышением достоверности моделей оценивания и прогнозирования надежности КА (9); обучением многомодельного комплекса обработки ТМИ на статистической информации о функционировании БА однотипных КА при различных испытаниях и на этапе летной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал нелинейный характер уравнений состояния и наблюдения БА КА с высоким уровнем автономности и негауссовский характер действующих в анализируемых временных рядах ТМП возмущений, что обусловлено нестационарными процессами деградации характеристик БА, воздействием факторов внешней среды, негативным развитием НС на борту КА, а также различными неисправностями в БА, возникающими в процессе летной эксплуатации КА. Эффективным подходом к решению задачи углубленного анализа ТС БА КА с высоким уровнем автономности является модельный подход. При реализации автоматизированных систем поддержки принятия решения оператором НКУ в наземном сегменте СИТО модельный подход можно успешно распространить на этапы: первичной обработки ТМИ с решением задачи нелинейной фильтрации в условиях воздействия негауссовских возмущений; вторичной обработки ТМИ с решением задачи отнесения текущей ситуации к множеству РС в базе данных КА; оценивания и прогнозирования вероятности безотказной работы БА на заданное время упреждения; проактивного управления периодичностью проведения операций контроля ТС с целью поддержания заданной надежности функционирования КА.

Список используемых источников

1. Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Исследование процесса диагностирования бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов с использованием дискретно-событийной имитационной модели // Труды СПИИРАН. – 2018. – № 1(56). – С. 95–121.
2. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.Н. Сологуб, В.П. Макаров. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
3. Калинин В.Н., Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. – 1995. – №1. – С.56–61.
4. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 864 с.
5. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
6. Martinez-Guerra R., Mata-Machuca J.L. Fault Detection and Diagnosis in Nonlinear Systems. – NewYork: Springer, 2014. – 128 p.
7. Подмастерьев К.В, Мусеев С.А. Прогнозирующий контроль радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени. Ч. 1. Теоретические основы и модели, характеристики дрейфа параметров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2–3 (293). – С. 135–144.
8. Мишанов Р.О. Разработка прогнозной модели качества полупроводниковых приборов методом экстраполяции // Известия Самарского центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 594–599.

9. *Козырев Г.И.* Метод минимизации объема экспериментальных данных при регрессионной идентификации статических объектов с заданной точностью // Автоматика и вычислительная техника. – 1994. – № 4. – С. 70–75.
10. *Мороз В.И., Ромашенко Е.К., Потюпкин А.Ю.* Решение задач математической обработки телеизмерений. – М.: Министерство обороны РФ, 2001. – 163 с.
11. Первичная обработка телеметрической информации с использованием динамических моделей изменения параметров и парциальной нелинейной фильтрации / Г.Н. Мальцев, В.Л. Якимов, С.В. Соловьев, Н.В. Лебедева // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 5. – С. 22–34.
12. *Якимов В.Л.* Повышение безопасности функционирования объектов ракетно-космической техники парированием нештатных ситуаций // Труды 8 Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – СПб.: ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 2005. – Т. 2. – С. 383–389.

А.Н. Абакумов,
кандидат техн. наук;
А.С. Босый;
И.Ю. Еремеев,
профессор, доктор техн. наук;
А.В. Передрий,
доцент

МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ПОСЫЛОК В ПРОСТРАНСТВЕ НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ ОПОРНОЙ ТРАЕКТОРИИ С ЦЕЛЬЮ ДЕКОМПОЗИЦИИ ГРУППОВОГО СИГНАЛА МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

В статье рассмотрены вопросы декомпозиции группового сигнала множественного доступа спутниковых систем связи (ССС) с временным разделением в условиях априорной неопределенности коммутационно-адресных параметров на основе кластеризации временных посылок в пространстве неэнергетических параметров по критерию максимальной невязки между образами временных посылок в пространстве неэнергетических параметров и аппроксимирующей кривой.

Ключевые слова: декомпозиция группового сигнала, земная станция, спутник-ретранслятор, кластеризация.

ВВЕДЕНИЕ

Радиомониторинг спутниковых систем связи, осуществляемый в интересах выявления несанкционированных пользователей, реализуется на основе решения двух задач, а именно: определения местоположение источников радиоизлучения [1]; анализ служебной и семантической частей сообщений.

Текущее состояние радиоэлектронной обстановки, формируемой современными СССР, характеризуется широким использованием сигналов со сложной частотно-временной структурой, что затрудняет получение доступа к семантической части передаваемых сообщений. В частности, технология множественного доступа с временным разделением (МДВР) примеряется в коммерческих системах Intelsat, Eutelsat, DirecWay, SkyEdge, FaraWay, LinkStar, Link-Way, SkyWan и т.д. В сложившейся ситуации, на первый план выносится вопрос обеспечения аппаратурной доступности к сигналам отдельных абонентских терминалов (АТ), что достигается путем декомпозиции группового сигнала.

В работе [2] описан метод анализа сигналов со сложной частотно-временной структурой, позволяющий проводить разделения абонентских терминалов без доступа к семантической составляющей передаваемых сообщений и к коммутационно-адресным параметрам. Данный метод основан на локализации временных посылок от одного АТ интерпретированных в пространстве неэнергетических параметров. Данное свойство объяснено тем, что неэнергетические параметры радиосигнала на выходе каждого АТ являются уникальными.

На практике, радиообмен в СССР, функционирующих через космические аппараты-ретрансляторы (КА-Р) на геостационарной орбите (ГСО), характеризуется динамическим изменением значений физических параметров радиосигналов, обусловленным целым рядом причин [3]. При этом, применение известного метода [2] не представляется возможным.

Учет изменения физических параметров для применения метода [2] требует использования большого объема разнородных априорных данных, таких как координаты ИРИ и КА-Р,

состояние ионосферы и тропосферы, температура слоев атмосферы, влажность на всей протяженности радиотрассы и так далее, что на практике является не решаемой задачей [4].

Таким образом, целью статьи является разработка метода декомпозиции группового сигнала МДВР на основе кластеризации временных посылок в пространстве неэнергетических параметров в условиях отсутствия доступа к коммутационно-адресным параметрам.

МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦИИ ГРУППОВОГО СИГНАЛА МДВР НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ПОСЫЛОК В ПРОСТРАНСТВЕ НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В модели изменения физических параметров радиосигнала с МДВР показано, что каждая временная посылка может быть описана набором оценок неэнергетических параметров, в том числе временем ее приема [4]. При этом, каждая временная посылка формирует образ в многомерном пространстве параметров (рис. 1), который может быть наглядно представлен точкой в декартовой K -мерной системе координат.

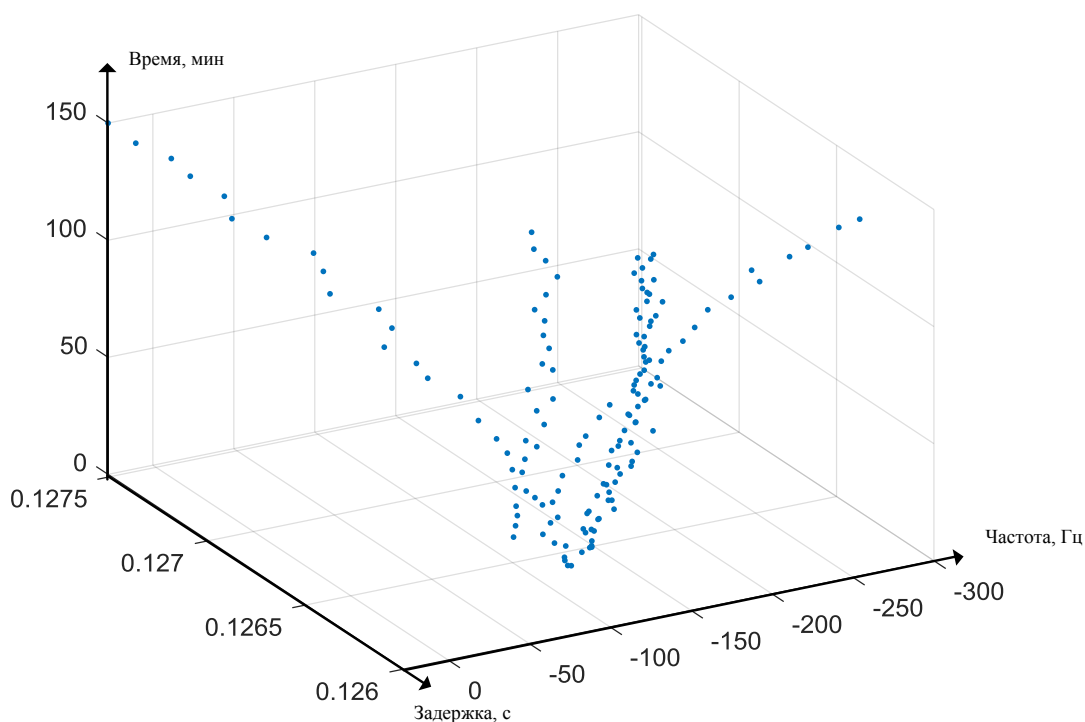


Рис. 1. Образы временных посылок в 3-мерном пространстве параметров

Принимая во внимание тот факт, что интерпретация образов временных посылок в виде точек в евклидовом пространстве параметров позволяет делать выводы о тенденциях изменения совокупности параметров, можно говорить о кластеризационных свойствах рассматриваемых образов.

Таким образом, представляется возможным производить классификацию образов с помощью функций расстояния. В классическом случае при наличии информации о центрах кластеров целесообразно использовать расстояние от образов до них [5]. В реальных условиях радиоконтроля параметры кластеров (размер, центры, плотность) определяются рядом факторов, таких как: загрузка канала; количество активных абонентов, осуществляющих передачу данных; наличие помеховых излучений и их мощность; естественные шумы радиолинии и приемопередающих устройств и т.д.

Обобщенно о характере изменения физических параметров АТ можно сказать, что на него влияют факторы двух видов: медленно меняющиеся, интервал корреляции которых много больше интервала между временными посылками отдельного АТ, и быстро меняющиеся, интервал корреляции которых много меньше интервала между временными посылками конкретного АТ. Закон изменения медленно меняющихся факторов может быть аппроксимирован по апостериорным данным гладкой кривой в K -мерном пространстве с некоторой точностью [4]. Быстро меняющиеся факторы нельзя учесть, поэтому, их влияние можно полагать случайным.

С учетом сказанного можно записать, что

$$Y_{<k>}^{(n)}(t_i) = F_{<k>}^{(n)}(t_i) + \xi_{<k>}^{(n)}(t_i), \quad (1)$$

где $Y_{<k>}^{(n)}(t_i)$ – наблюдаемые параметры ВП от n -го АТ в k -ом пространстве;

$F_{<k>}^{(n)}(t_i)$ – гладкая функция параметров ВП в k -ом пространстве, обусловленная влиянием медленно меняющихся факторов;

$\xi_{<k>}^{(n)}(t_i)$ – случайная составляющая параметров ВП в k -ом пространстве, обусловленная влиянием быстро меняющихся, случайных факторов;

t_i – момент времени приема временной посылки.

По результатам наблюдения при определенных условиях с использованием методов аппроксимации возможно получить оценку $F_{<k>}^{(n)}(t_i)$ в виде уравнения кривой в k -ом пространстве, а именно

$$F_{<k>}^{(n)}(t_i) = \sum_{l=0}^b a_{<k>,l}^{(n)} \cdot t_i^l, \quad (2)$$

где $a_{<k>,l}^{(n)}$ – коэффициенты аппроксимирующего полинома степени b .

При этом, формируется остаточная ошибка аппроксимации

$$e_{<k>}^{(n)}(t_i) = F_{<k>}^{(n)}(t_i) - \hat{F}_{<k>}^{(n)}(t_i). \quad (3)$$

Полагая, что $F_{<k>}^{(n)}(t_i) \neq F_{<k>}^{(s)}(t_i)$, при $s \neq n$ на всем интервале наблюдения $0 \leq t_i \leq t_{\text{набл}}$, качество исходных данных и характеристики методического аппарата аппроксимации обеспечивают возможность выполнения условий:

$$F_{<k>}^{(n)}(t_i) \neq F_{<k>}^{(s)}(t_i) \text{ при } 0 \leq t_i \leq t_{\text{набл}}, \quad (4)$$

$$\Delta(F_{<k>}^{(n)}(t_i), F_{<k>}^{(n)}(t_i)) < \Delta(F_{<k>}^{(n)}(t_i), F_{<k>}^{(s)}(t_i)), \quad (5)$$

где Δ – оператор вычисления скалярной невязки в k -ом пространстве.

Задачу декомпозиции группового сигнала можно свести к задаче отыскания множества аппроксимирующих полиномов $\{A_{[k,b]}^{(l)}(t)\}_H$ на множестве исходных данных в виде оценок

параметров ВП $\{Y_{<k>}^{(l)}(t_i)\} = \bigcup_{l=1}^H \{Y_{<k>}^{(l)}(t_i)\}$, обеспечивающих выполнение условия минимизации

ошибки кластеризации по заданному критерию.

В качестве критериальной базы могут быть выбраны критерии:

- минимизация числа ВП, отнесенных к ошибочным кластерам;
- максимизация числа ВП, отнесенных к своему кластеру;
- задание уровня доверия к элементам кластеров;
- комбинированные методы.

В условиях априорной неопределенности числа и параметров альтернативных кластеров и при наличии априорных оценок статистических параметров быстроменяющейся стохастической составляющей в оценках параметров ВП, для обоснования порога принятия решения о

принадлежности ВП к определенному кластеру, целесообразно воспользоваться критерием Неймана-Пирсона.

При разработке предлагаемого метода учитывались следующие важные свойства анализируемых данных, описанные в работе [4].

Свойство №1. В произвольный момент времени в ГС содержится не более одной временной посылки.

Свойство №2. Имеет место периодичность временных посылок, передаваемых от одного АТ в течении передачи сообщения.

Свойство №3. Период отправки ВП от АТ определяется его приоритетом. АТ с наивысшим приоритетом передают данные с самым коротким периодом.

Свойство №4. Изменения значений физических параметров радиосигнала во времени, под действием $F_{<k>}^{(n)}(t_i)$, на интервале наблюдения 1 час описываются полиномом не выше третьей степени.

Указанные свойства позволили сформулировать метод декомпозиции группового сигнала МДВР на основе кластеризации временных посылок в пространстве неэнергетических параметров.

Схема основных этапов метода декомпозиции группового сигнала МДВР на основе кластеризации неэнергетических параметров его временных посылок, учитывающего указанные особенности группового сигнала с МДВР, представлена на рис. 2.

Рассмотрим подробнее каждый из этапов.

Этапы 1, 2. Нормировка и децимация исходной выборки временных посылок с постоянным шагом.

На данных этапах путем перебора шага и начальной фазы формируется множество прореженных выборок.

Пусть мощность множества анализируемых ВП в виде образов X равна M . Тогда, ВП интерпретируемая как точка в K -мерном евклидовом пространстве в i -й момент времени задается в виде $x_i = \langle y_{1,i}, y_{2,i}, \dots, y_{K-1,i}, t_i \rangle$, где $1 < i < M$. Тогда множество точек может быть представлено матрицей параметров размерностью $M \times K$.

Оценки физических параметров имеют различные физические размерности и порядки числовых значений, так, например, несущая частота измеряется миллионами Гц, а временная задержка тысячными долями секунд (рис. 3).

На рис. 3 представлен результат нормировки физических параметров и переход к пространству относительных параметров с сохранением характера флуктуаций начальных физических параметров.

В таких условиях для корректного использования евклидова расстояния в качестве меры близости образов необходимо провести нормировку, например в виде

$$y_k^{(\text{норм})}(t_i) = \frac{y_k^{(\text{набл})}(t_i) - \mu_{y_k}}{\sigma_{y_k}} \quad (6)$$

где μ_{y_k} — математическое ожидание k -го физического параметра;

σ_{y_k} — среднеквадратическое отклонение k -го физического параметра.

Путем изменения шага T и начального сдвига ϕ при $1 < \phi_j < T$, выраженных целыми числами, формируются все возможные варианты децимации множества образов X

$$Z = D(X, T, \phi), \quad (7)$$

где Z — результат децимации X с шагом T и начальным сдвигом ϕ .

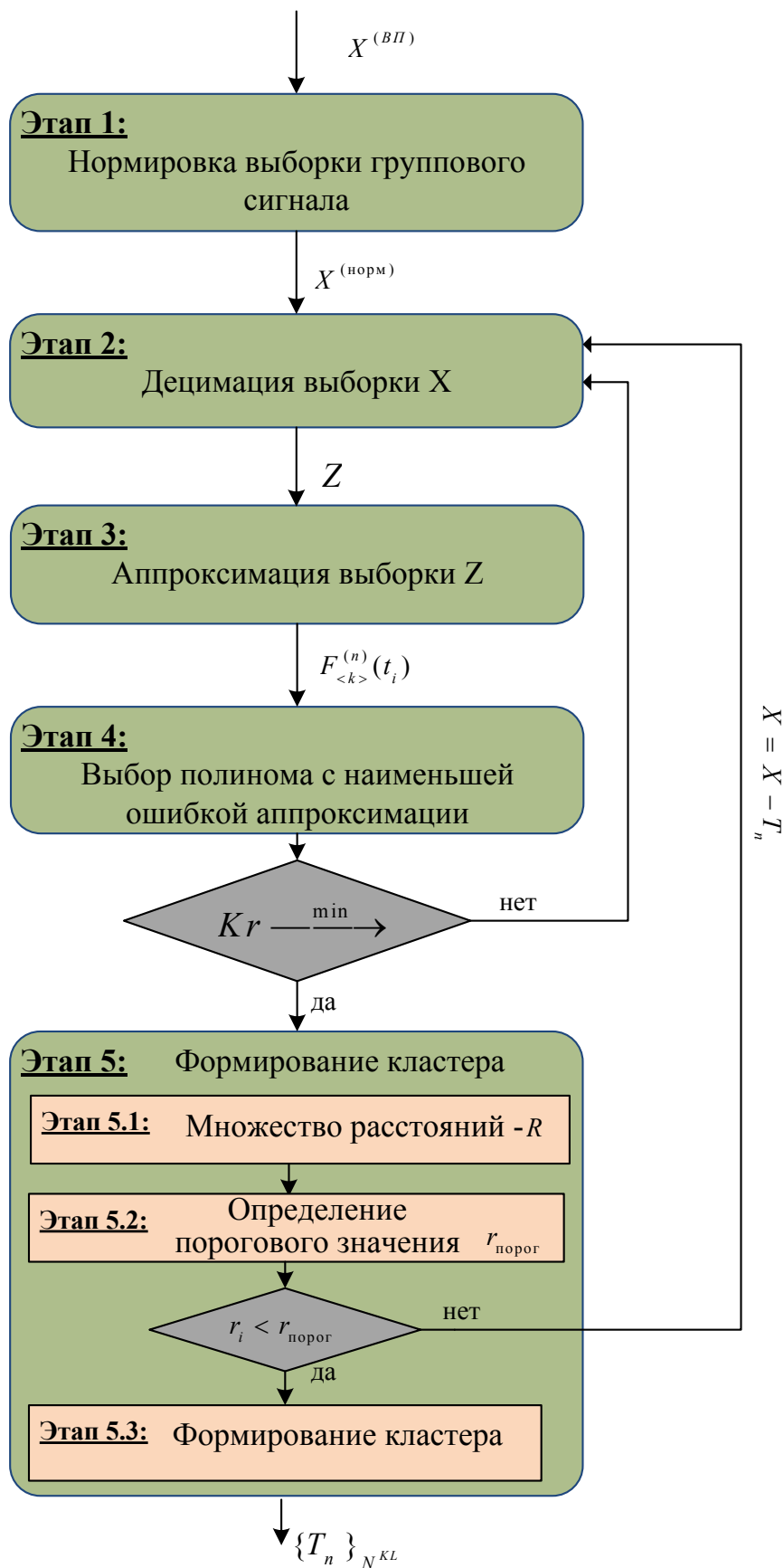


Рис. 2. Структурная схема метода декомпозиции

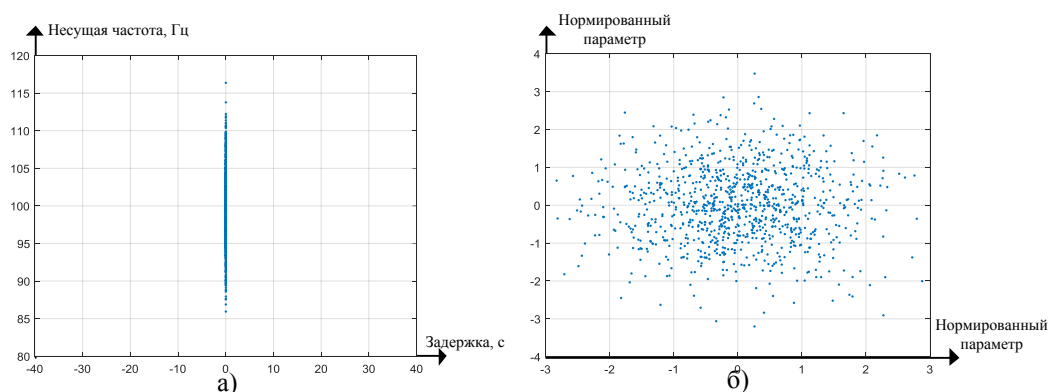


Рис. 3. Пример флуктуации задержки и несущей частоты радиосигнала без учета влияния канала связи:

а – представление в равных осях без нормировки; б – представление после нормировки

Этап 3. Аппроксимация выборки Z .

Каждая подвыборка Z , полученная на предыдущем этапе аппроксимируется кривой, описанной полиномом (рис. 4). В качестве аппроксимирующих применялись полиномы второго $Q_{\text{appr}_2}(t) = b \cdot t^2 + c \cdot t + d$ и третьего порядков $Q_{\text{appr}_3}(t) = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d$, коэффициенты которых определены по методу наименьших квадратов [7].

Выбор порядка полинома зависит от отношения сигнал/шум на входе аппаратуры регистрации сигнала, данный вопрос рассмотрен в модели [4].

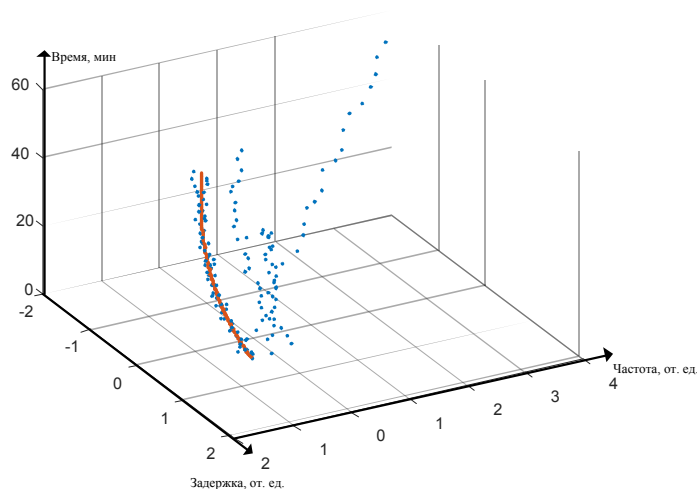


Рис. 4. Результат аппроксимации прореженной выборки

Этап 4. Выбор полинома с наименьшей ошибкой аппроксимации.

Показателем качества аппроксимации выборки Z выступает коэффициент среднеквадратической невязки Kr .

Выбранный полином задает опорную траекторию, описывающую изменения параметров под действием медленно меняющихся факторов $F_{<k>}^{(n)}(t_i)$, характерных для АТ (рис. 5).

Этап 5. Формирование кластера.

Для формирования кластера ВП одного АТ необходимо из всего множества X отобрать образы, удаленные от опорной траектории не более, чем на величину, обусловленную влиянием шумов и стохастических факторов.

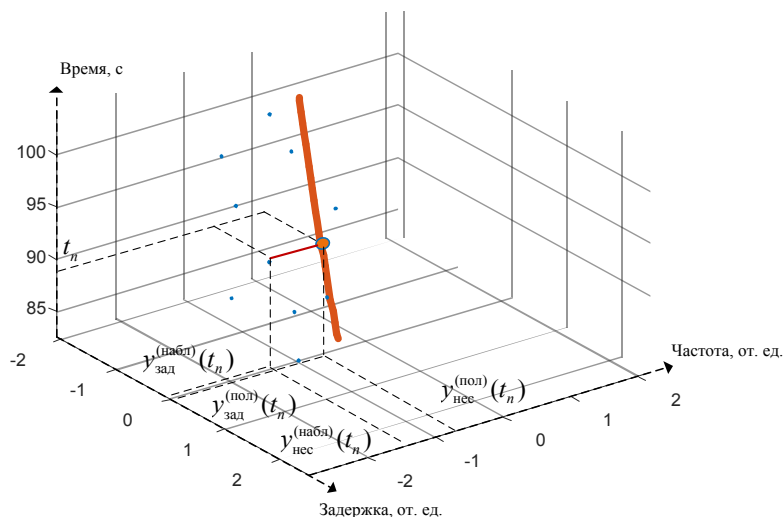


Рис. 5. Схема расчета расстояния от образа ВП до опорной траектории

Учитывая особенности анализируемых данных, определение порогового значения $r_{\text{порог}}$ основано на том, что временные послышки от одного АТ удалены от опорной траектории на расстояния, имеющие общее статистическое свойство – закон распределения.

Флуктуации физического параметра, вызванные влиянием шумов и иных случайных факторов можно рассматривать как случайную величину, распределенную по нормальному закону [6]. В этом случае, евклидово расстояние ВП от опорной траектории является случайной величиной R , распределенной по закону квадратного корня из суммы квадратов $K-1$ случайных величин, распределенных по нормальному закону.

При рассмотрении наиболее простого случая, когда в качестве параметров выступают несущая частота и временная задержка (при $K = 3$) имеет место распределение Релея. Данная теоретическая гипотеза о законе распределения подтверждена по методу Пирсона [7].

По гистограмме расстояний определяется положение первого экстремума. На основании данного параметра вычисляется оценка теоретической функции плотности вероятности (рис. 6). Для задания порога использовался метод Неймана-Пирсона, соответствующий заданному значению вероятности пропуска образа к классу, например, не выше 0,1.

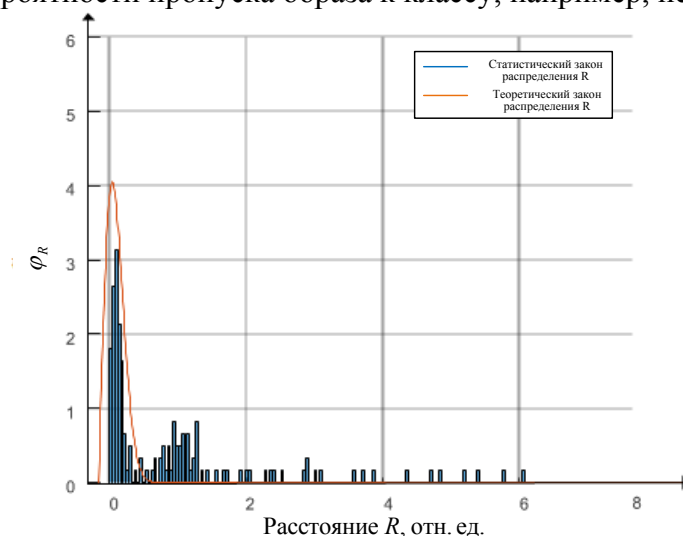


Рис. 6. Принятие решения о принадлежности ВП к анализируемому кластеру

На этапе 5.1 все временные посылки, удаленные от опорной траектории не более чем на пороговое значение, объединяются в один кластер T_n и исключаются из дальнейшего рассмотрения $X = X - T_n$. Оставшаяся выборка подается на вход этапа 2.

В результате выполнения этапов метода формируется множество кластеров $\{T_n\}_{N^{KL}}$, число данных кластеров соответствует числу АТ, формирующих групповой сигнал.

В качестве примера на рис. 7 представлен результат декомпозиции группового сигнала на четыре сигнала отдельных АТ.

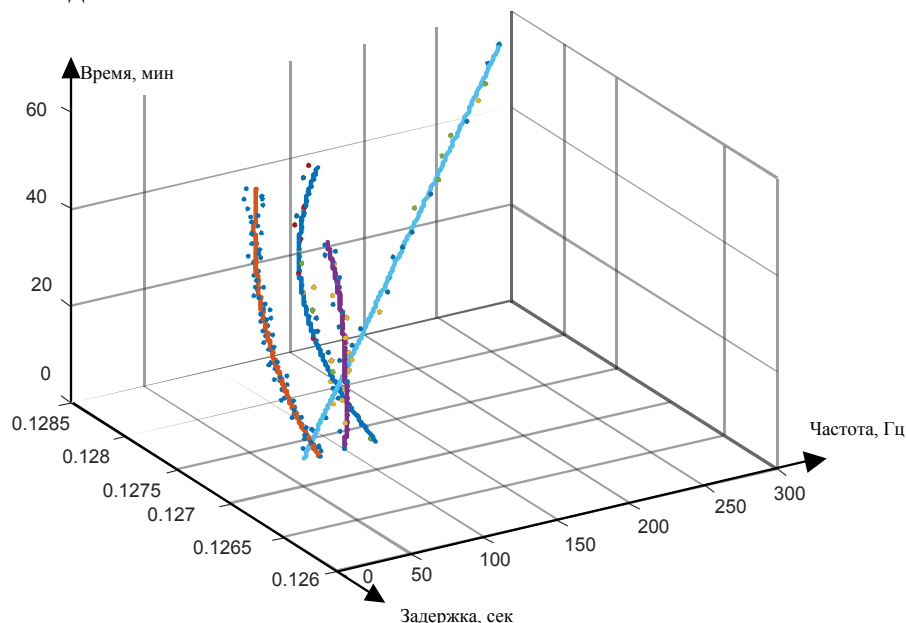


Рис. 7. Результат применения метода декомпозиции

Для определения качественных показателей работы метода проведен ряд испытаний при различных количествах АТ и значениях отношения сигнал/шум для выборки из 1000. Данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты применения разработанного метода

Число АТ, шт.	Значение отношения сигнал/шум, дБ	Число временных посылок, отнесенных к кластерам, шт.	Число временных посылок, недостающих в кластере, шт.
5	5	408	408
4	5	348	348
3	5	189	189
5	10	22	22
4	10	16	16
3	10	12	12
5	15	19	19
4	15	12	12
3	15	11	11

Таким образом разработанный метод позволяет осуществить декомпозицию группового сигнала ССС с МДВР в условиях априорной неопределенности относительно коммутационно-адресных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа закономерностей структуры групповых сигналов и динамики изменения параметров временных посылок разработан итерационный метод декомпозиции группового сигнала с МДВР в условиях априорной неопределенности коммутационно-адресных параметров. Разработанный метод позволяет декомпозировать групповой сигнал на сигналы отдельных АТ на основе кластеризации временных посылок в пространстве неэнергетических параметров при ведении радиоэлектронного контроля.

Список используемых источников

1. Об утверждении правил осуществления радиоконтроля в Российской Федерации: Постановление Правительства РФ № 175 от 1.04.2005. – URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 25.12.18).
2. Цыганов А.С., Замарин А.И., Тавалинский Д.А. Метод выявления скрытых периодичностей цифровых информационных последовательностей в условиях приема групповых сигналов цифровых систем передачи информации // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. № 652. – С.57–65.
3. Босый А.С., Алешин С.Н., Андронов С.И., Уткин В.В. Декомпозиция группового сигнала на основе кластеризации основных параметров элементарных сигналов в условиях отсутствия доступа к коммутационной части // Успехи современной Радиоэлектроники. – М.: Радиотехника, 2017. – №9. – С.52–56.
4. Модель влияния основных факторов на временную задержку распространения радиосигналов спутниковых линий связи / А.Н. Абакумов, С.И. Андронов, А.С. Босый, Д.С. Земцев // Научная мысль. – 2018. – №1(27). – С.41–46.
5. Гонсалес Р.К. Принципы распознавания образов / пер. с англ. И.Б. Гуревича: под ред. Ю.И. Журавлева. – М.: Мир, 1978. – 412 с.
6. Распределение вероятностей, касающихся моделирования распространения радиоволн / Рек. МСЭ-R P.1057-2. – Женева, 2007. – 18 с.
7. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Р.М. Юсупов, Г.Б. Петухов, В.Н. Сидоров и др.; под ред. Р.М. Юсупова. – М.: МО СССР, 1984. – 786 с.

А. С. Босый;
И. Ю. Еремеев,
доктор техн. наук, профессор;
К. Л. Овчаренко,
кандидат техн. наук;
М. М. Тюстин;
Е. Ю. Шиловский

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ ПО РЕТРАНСЛИРОВАННЫМ СИГНАЛАМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА-РЕТРАНСЛЯТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье представлен метод определения местоположения современных земных станций с узкими диаграммами направленности с применением космического аппарата-ретранслятора, расположенного на геостационарной орбите, а также ретранслятора на беспилотном летательном аппарате, барражирующем в районе радиомониторинга.

В отличие от известных методов определения местоположения земных станций, реализуемых на основе оценивания взаимных задержек ретранслированных сигналов, в качестве параметра положения в предлагаемом методе выступает псевдодальность, а вычисление координат земных станций выполняется в условиях априорной неопределенности относительно местоположения космического аппарата-ретранслятора.

Оценивание координат земных станций реализуется методом максимального правдоподобия в результате решения системы дифференциальных уравнений. Для разработанного метода получены аналитические выражения потенциальной точности оценивания координат земной станции на основе нижней границы Рао-Крамера.

Выполнен расчет потенциальной точности определения местоположения земной станции для района размером 30 на 30 км. Показано, что погрешность оценок, полученных в результате статистических испытаний, согласуется с параметрами эллипсоида ошибок, полученными на основе аналитических выражений.

Практическое применение разработанного метода целесообразно для организации противодействия нелегитимному использованию частотного ресурса космических аппаратов-ретрансляторов спутниковых систем связи.

Ключевые слова: определение местоположения, земная станция, космический аппарат-ретранслятор, беспилотный летательный аппарат, взаимная задержка сигналов, псевдодальность, метод максимального правдоподобия.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения местоположения (ОМП) источников радиоизлучения (ИРИ) вызывает особый интерес в таких областях как радионавигация [1], связь и обработка сигналов [2, 3]. Современные системы ОМП ИРИ гражданского назначения широко применяются для отыскания потерпевших в зоне стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций [4, 5], а также при мониторинге радиочастотного спектра на предмет его нелегитимного использования [6]. Так например, несанкционированное использование ограниченного частотного ресурса космического аппарата-ретранслятора (КА-ретранслятора) приводит к снижению качества функционирования спутниковой системы связи (ССС).

Наиболее широкое распространение получили методы ОМП ИРИ состоящие из двух этапов. На первом этапе выполняется оценивание координатно-информативного параметра (КИП), к которому можно отнести направление на ИРИ (пеленг), взаимную задержку ретранслированных сигналов, а также их частотное рассогласование. Второй этап включает в себя вычисление оценок параметра положения (ПП) и оценивание координат ИРИ.

В настоящее время довольно хорошо изучены методы ОМП, основанные на пеленговании ИРИ. Вместе с тем, даже такие перспективные подходы к ОМП ИРИ, как поляризационное пеленгование [7, 8], применимы только в условиях высокого отношения сигнал/шум (ОСШ) и требуют дополнительного учета ориентации приемной антенной системы в пространстве, что особенно критично при размещении ее на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [9].

Известный способ ОМП земных станций (ЗС) ССС [10], основанный на измерении энергетических параметров сигналов ЗС ССС, не требует учета ориентации БЛА в пространстве. Однако основным его недостатком является низкая точность оценивания координат ИРИ. Указанный недостаток свойственен и методам, базирующимся на применении нескольких КА, расположенных на геостационарной орбите (ГСО). При их использовании в качестве КИП предлагается измерять взаимную задержку и разность несущих частот ретранслированных сигналов ЗС.

В работе [11] описывается разностно-дальномерный метод ОМП ЗС, позволяющий вычислять координаты современных ЗС VSAT (Very Small Aperture Terminal) для которых характерны узкие диаграммы направленности (рис. 1), обеспечивая достаточно высокую точность, при которой типовая погрешность оценивания координат ЗС ССС не превышает сотни метров. В этом случае КИП является взаимная задержка сигналов ЗС, ретранслированных через БЛА и КА, а в качестве ПП выступает разность расстояний.

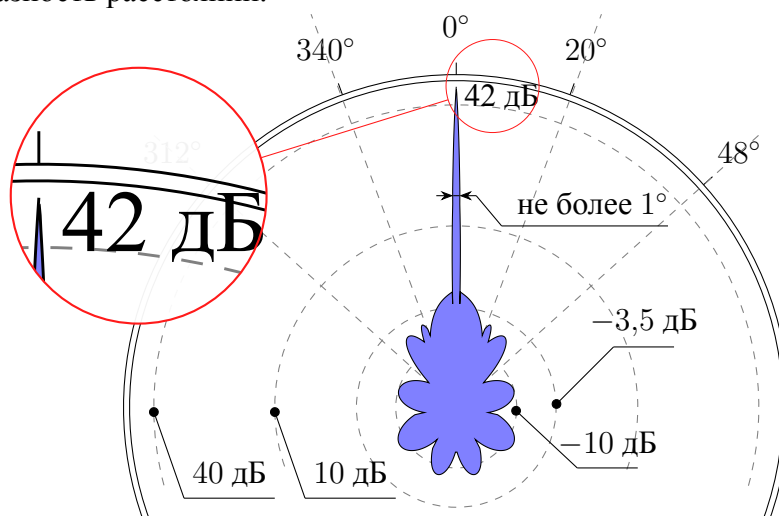


Рис. 1. Вариант диаграммы направленности антенной системы ЗС VSAT

Следует отметить, что для реализации указанного метода требуется априорное знание координат КА-ретранслятора, которые могут быть найдены с применением служебной информации NORAD в формате TLE (Two-line element). В условиях, когда данные TLE устарели или недоступны потребителю, применение разностно-дальномерного метода ОМП ЗС ССС [11] не представляется возможным.

Таким образом, учитывая значимость решения задачи ОМП ЗС VSAT, несанкционированно использующих частотно-временной ресурс КА-ретрансляторов коммерческих ССС, и несовершенство существующих подходов к ОМП ЗС, целью статьи является разработка нового метода ОМП ЗС с применением ретрансляторов на БЛА и КА в условиях априорной неопределенности относительно координат КА-ретранслятора, расположенного на ГСО.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

По аналогии с известным подходом к ОМП ЗС ССС [11], схема реализации разработанного метода примет вид, представленный на рис. 2. В качестве КИП используется взаимная задержка сигналов ЗС, ретранслированных через КА, расположенный на ГСО, и БЛА, барражирующий в районе мониторинга. При этом можно принять координаты ретранслятора на БЛА $S_{\text{БЛА},i} = [x_{\text{БЛА},i}, y_{\text{БЛА},i}, z_{\text{БЛА},i}]^T$ (в i -й момент измерения КИП) и комплекса радиоэлектронного контроля (РЭК) $S_{\text{РЭК}} = [x_{\text{РЭК}}, y_{\text{РЭК}}, z_{\text{РЭК}}]^T$ известными, а местоположение ЗС $S = [s_1, s_2, s_3]^T = [x, y, z]^T$ и КА-ретранслятора $S_{\text{КА}}$ постоянным на время процесса ОМП.

Многократное вычисление взаимной задержки сигналов ЗС (на независимых выборках), ретранслированных через КА и подвижный БЛА, барражирующий в районе мониторинга, выполняется в условиях частотного рассогласования, когда точные значения несущих частот сигналов

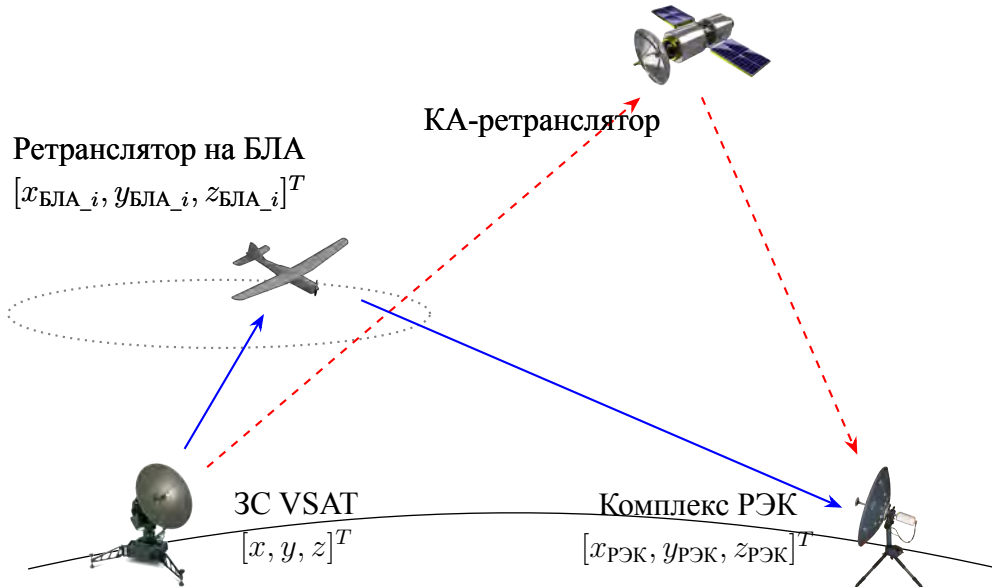


Рис. 2. Схема реализации метода ОМП ЗС ССС с применением ретрансляторов на БЛА и КА

ЗС на входе приемника комплекса РЭК являются неизвестными. Так как вопрос оценивания взаимной задержки ретранслированных сигналов ИРИ при частотном рассогласовании достаточно полно исследован в работах [2, 12, 13], задача вычисления КИП в рамках данной статьи рассматриваться не будет.

Таким образом, исходными данными для разработанного метода ОМП ЗС ССС являются:

- вектор оценок взаимной задержки сигналов ЗС, ретранслированных через КА и БЛА, $\Delta\tilde{T} = [\Delta\tilde{\tau}_1, \Delta\tilde{\tau}_2, \dots, \Delta\tilde{\tau}_N]^T$;
- вектор координат ретранслятора на БЛА, в которых были сделаны измерения взаимной задержки ретранслированных сигналов ЗС, $\mathbf{S}_{\text{БЛА}} = [\mathbf{S}_{\text{БЛА},1}, \mathbf{S}_{\text{БЛА},2}, \dots, \mathbf{S}_{\text{БЛА},N}]^T$;
- координаты комплекса РЭК $\mathbf{S}_{\text{РЭК}} = [x_{\text{РЭК}}, y_{\text{РЭК}}, z_{\text{РЭК}}]^T$.

Требуется выполнить преобразование $F_{\text{ОМП}}$ вектора оценок взаимной задержки сигналов ЗС, вектора координат ретранслятора на БЛА и координат комплекса РЭК в оценку координат ЗС $\tilde{\mathbf{S}} = [\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}]^T$

$$[\Delta\tilde{T}, \mathbf{S}_{\text{БЛА}}, \mathbf{S}_{\text{РЭК}}]^T \xrightarrow{F_{\text{ОМП}}} [\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}]^T. \quad (1)$$

Реализация разработанного метода предполагается в условиях следующих ограничений и допущений:

- ретранслятор на БЛА, координаты которого известны, барражирует в районе непрерывного функционирования ЗС VSAT, координаты которой необходимо определить;
- на время процедуры ОМП ИРИ местоположение ЗС и КА-ретранслятора на ГСО не изменяется;
- комплекс РЭК, координаты которого известны, совмещен с наземным пунктом управления БЛА и находится в основном луче диаграммы направленности передающей антенны КА-ретранслятора.

МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА ПОЛОЖЕНИЯ

Согласно схеме реализации метода ОМП ЗС, изображенной на рис. 2, оценку взаимной задержки сигналов ЗС, ретранслированных через БЛА и КА по i -му измерению $\Delta\tilde{\tau}_i$, можно представить в виде следующего выражения:

$$\Delta\tilde{\tau}_i = C^{-1} (\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{КА}}\| + \|\mathbf{S}_{\text{РЭК}} - \mathbf{S}_{\text{КА}}\| - (\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{БЛА},i}\| + \|\mathbf{S}_{\text{РЭК}} - \mathbf{S}_{\text{БЛА},i}\|)) + \hat{\xi}_{\Delta\tau}, \quad (2)$$

где C – скорость распространения радиоволн в свободном пространстве;
 $\|\circ\|$ – знак евклидовой метрики;
 $\hat{\xi}_{\Delta\tau}$ – случайная величина, определяемая погрешностью оценивания КИП.

Для перехода от КИП к ПП необходимо умножить вектор оценок взаимной задержки сигналов ЗС $\Delta\tilde{T}$, ретранслированных через БЛА и КА, на скорость распространения радиоволн в свободном пространстве C

$$\Delta\tilde{R} = \Delta\tilde{T} \cdot C = [\Delta R_1 + \hat{\xi}_{\Delta R}, \Delta R_2 + \hat{\xi}_{\Delta R}, \dots, \Delta R_N + \hat{\xi}_{\Delta R}]^T, \quad (3)$$

где ΔR_i – истинное значение ПП при i -м измерении;

$\hat{\xi}_{\Delta R}$ – случайная величина, определяемая погрешностью оценивания ПП, $\hat{\xi}_{\Delta R} = \hat{\xi}_{\Delta\tau} \cdot C$.

С учетом того, что координаты КА-ретранслятора являются неизвестными, схема вычисления ПП при i -м измерении примет вид, представленный на рис. 3.

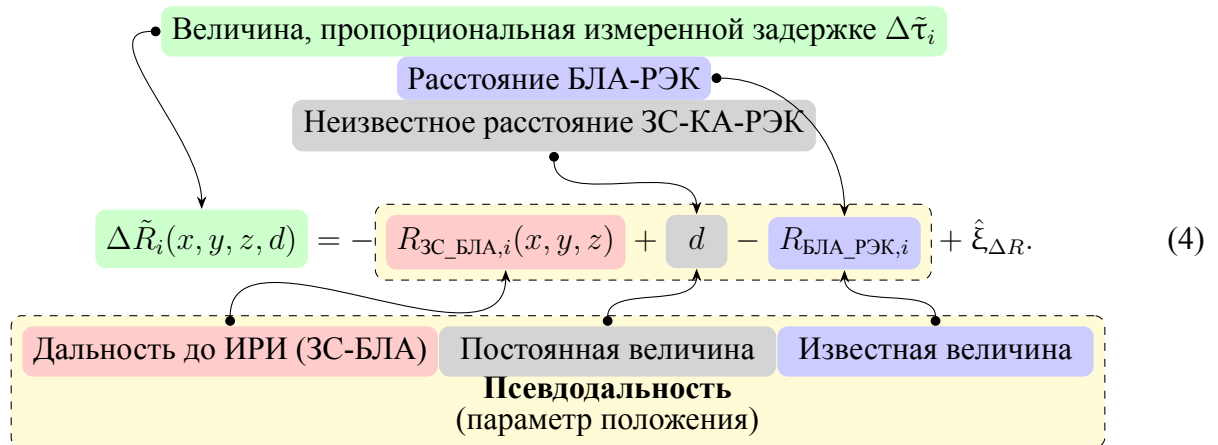


Рис. 3. Схема вычисления параметра положения при i -м измерении в условиях априорной неопределенности относительно координат КА-ретранслятора

В этом случае в качестве ПП выступает псевдодальность $\Delta\tilde{R}_i(x, y, z, d)$ равная разности постоянной величины $d = \|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{КА}\| + \|\mathbf{S}_{РЭК} - \mathbf{S}_{КА}\|$ и суммы расстояний между ЗС и ретранслятором на БЛА $R_{ЗС_БЛА,i} = \|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{БЛА,i}\|$, ретранслятором на БЛА и комплексом РЭК $R_{БЛА_РЭК,i} = \|\mathbf{S}_{РЭК} - \mathbf{S}_{БЛА,i}\|$, причем дальность $R_{ЗС_БЛА,i}$ функционально связана с координатами ЗС следующим образом:

$$R_{ЗС_БЛА,i}(x, y, z) = \sqrt{(x - x_{БЛА,i})^2 + (y - y_{БЛА,i})^2 + (z - z_{БЛА,i})^2}. \quad (5)$$

Принимая во внимание тот факт, что погрешность оценивания ПП $\hat{\xi}_{\Delta R}$ пропорциональна погрешности вычисления взаимной задержки сигналов ЗС $\hat{\xi}_{\Delta\tau}$, ретранслированных через БЛА и КА, а так же то, что случайная величина $\hat{\xi}_{\Delta\tau}$ подчиняется нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием (МО) [11, 13], можно сделать вывод о том, что $\hat{\xi}_{\Delta R}$ также будет распределена по нормальному закону с МО равным нулю $M(\hat{\xi}_{\Delta R}) = 0$.

Так как в рамках рассматриваемой модели оценки ПП независимы, а погрешность их измерения подчиняется нормальному закону распределения и имеет нулевое МО, для оценивания координат ЗС представляется возможным применить метод максимального правдоподобия.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

Для модели оценивания ПП в условиях априорной неопределенности относительно координат КА-ретранслятора (4) функция правдоподобия представляет собой произведение условных гауссовских функций плотности вероятности погрешности оценок разностей расстояний [4]:

$$L_{\hat{\xi}_{\Delta R}}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|x, y, z, d) = \prod_{i=1}^N \varphi_{\hat{\xi}_{\Delta R}}(\Delta \tilde{R}_i|x, y, z, d) =$$

$$= \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right)^N \cdot \prod_{i=1}^N \sigma_{\Delta R, i}^{-1} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta R, i}^{-2} \left(\Delta \tilde{R}_i + R_{\text{ЗС_БЛА}, i}(x, y, z) + R_{\text{БЛА_РЭК}, i} - d \right)^2 \right), \quad (6)$$

где $\sigma_{\Delta R, i}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной величины $\hat{\xi}_{\Delta R}$ в условиях i -го измерения псевдодальности.

Не сложно заметить, что функция правдоподобия (6) достигает наибольшего значения при максимальной величине аргумента экспоненты. Следовательно, оценкой координат ЗС по результатам измерений ПП является аргумент минимизации целевой функции вида

$$F_{\text{ПД}}(x, y, z, d) = \sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta R, i}^{-2} \left(\Delta \tilde{R}_i + R_{\text{ЗС_БЛА}, i}(x, y, z) + R_{\text{БЛА_РЭК}, i} - d \right)^2, \quad (7)$$

$$[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{d}]^T = \underset{\{x, y, z, d\}}{\operatorname{argmax}} \left(L_{\hat{\xi}_{\Delta R}}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|x, y, z, d) \right) =$$

$$= \underset{\{x, y, z, d\}}{\operatorname{argmax}} \left(\ln \left(L_{\hat{\xi}_{\Delta R}}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|x, y, z, d) \right) \right) = \underset{\{x, y, z, d\}}{\operatorname{argmin}} (F_{\text{ПД}}(x, y, z, d)). \quad (8)$$

Равенству (8) удовлетворяют такие значения $[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{d}]^T$, которые соответствуют минимуму целевой функции $F_{\text{ПД}}(x, y, z, d)$ и могут быть найдены путем решения системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial F_{\text{ПД}}(x, y, z, d)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial F_{\text{ПД}}(x, y, z, d)}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial F_{\text{ПД}}(x, y, z, d)}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial F_{\text{ПД}}(x, y, z, d)}{\partial d} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Поскольку оценка параметра \tilde{d} , равная дальности ЗС-КА-РЭК, не представляет практического интереса при отыскании координат ЗС, в четвертом уравнении системы (9) можно выразить d через x, y и z , а именно:

$$-2 \sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta R, i}^{-2} \left(\Delta \tilde{R}_i + R_{\text{ЗС_БЛА}, i}(x, y, z) + R_{\text{БЛА_РЭК}, i} - d \right) = 0, \quad (10)$$

$$d(x, y, z) = \left(N \sum_{k=1}^N \sigma_{\Delta R, k}^{-2} \right)^{-1} \cdot \sum_{k=1}^N \sigma_{\Delta R, k}^{-2} \left(\Delta \tilde{R}_k + R_{\text{ЗС_БЛА}, k}(x, y, z) + R_{\text{БЛА_РЭК}, k} \right). \quad (11)$$

С учетом выражения (11), целевая функция (7) преобразуется к виду

$$F_{\text{ПД}}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta R, i}^{-2} \left(\Delta \tilde{R}_i + R_{\text{ЗС_БЛА}, i}(x, y, z) + R_{\text{БЛА_РЭК}, i} - \left(N \sum_{k=1}^N \sigma_{\Delta R, k}^{-2} \right)^{-1} \times \right. \\ \left. \times \sum_{k=1}^N \sigma_{\Delta R, k}^{-2} \left(\Delta \tilde{R}_k + R_{\text{ЗС_БЛА}, k}(x, y, z) + R_{\text{БЛА_РЭК}, k} \right) \right)^2, \quad (12)$$

а система (9) сокращается до трех уравнений

$$\frac{\partial F_{\text{ПД}}(x, y, z)}{\partial \mathbf{S}} = \mathbf{O}, \quad (13)$$

где \mathbf{O} – нулевая матрица-столбец, $\mathbf{O} = [0, 0, 0]^T$

Таким образом, окончательное выражение для целевой функции (12) не содержит координаты КА-ретранслятора. При этом оценка координат ЗС $[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}]^T$ может быть найдена путем решения системы из трех дифференциальных уравнений (13) одним из численных методов [14].

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Из теории математической статистики известно, что нижнюю границу дисперсии несмещенной оценки определяет неравенство Рао-Крамера. Для многомерного параметра \mathbf{S} ковариационная матрица $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{S}}} = \mathbf{M} \left(\left(\hat{\mathbf{S}} - \mathbf{M}(\hat{\mathbf{S}}) \right) \left(\hat{\mathbf{S}} - \mathbf{M}(\hat{\mathbf{S}}) \right)^T \right)$ не может быть меньше чем обратная матрица Фишера $\mathbf{J}_{\hat{\mathbf{S}}}^{-1}$, определяемая следующим выражением:

$$\mathbf{J}_{\hat{\mathbf{S}}} = \mathbf{M} \left(\frac{\partial L_{\hat{\mathbf{S}}|\Delta R}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|\mathbf{S})}{\partial \mathbf{S}} \left(\frac{\partial L_{\hat{\mathbf{S}}|\Delta R}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|\mathbf{S})}{\partial \mathbf{S}} \right)^T \right) = -\mathbf{M} \left(\frac{\partial^2 L_{\hat{\mathbf{S}}|\Delta R}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|\mathbf{S})}{\partial \mathbf{S} \partial \mathbf{S}^T} \right), \quad (14)$$

где $\frac{\partial^2 L_{\hat{\mathbf{S}}|\Delta R}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|\mathbf{S})}{\partial \mathbf{S} \partial \mathbf{S}^T}$ – матрица 3×3 из элементов вида $\frac{\partial^2 L_{\hat{\mathbf{S}}|\Delta R}(\Delta \tilde{\mathbf{R}}|\mathbf{S})}{\partial s_i \partial s_j}$.

Введя замену $R_{\text{ПД}, i}(x, y, z) = R_{\text{ЗС_БЛА}, i}(x, y, z) - d(x, y, z)$ и проведя преобразования аналогичные формулам (17)–(26), содержащимся в работе [11], можно привести выражение для матрицы Фишера (14) к виду

$$\mathbf{J}_{\hat{\mathbf{S}}} = \sum_{i=1}^N \left(\sigma_{\Delta R, i}^{-2} \cdot \left(\frac{\partial R_{\text{ПД}, i}(x, y, z)}{\partial \mathbf{S}} \right) \cdot \left(\frac{\partial R_{\text{ПД}, i}(x, y, z)}{\partial \mathbf{S}} \right)^T \right), \quad (15)$$

где частные производные функции $R_{\text{ПД}, i}(x, y, z)$ равны

$$\frac{\partial R_{\text{ПД}, i}(x, y, z)}{\partial x} = \frac{x - x_{\text{БЛА}, i}}{\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{БЛА}, i}\|} - \sum_{k=1}^N \frac{x - x_{\text{БЛА}, k}}{\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{БЛА}, k}\|}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial R_{\text{ПД},i}(x, y, z)}{\partial y} = \frac{y - y_{\text{БЛА},i}}{\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{БЛА},i}\|} - \sum_{k=1}^N \frac{y - y_{\text{БЛА},k}}{\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{БЛА},k}\|}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial R_{\text{ПД},i}(x, y, z)}{\partial z} = \frac{z - z_{\text{БЛА},i}}{\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{БЛА},i}\|} - \sum_{k=1}^N \frac{z - z_{\text{БЛА},k}}{\|\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{БЛА},k}\|}. \quad (18)$$

Таким образом, точность ОМП ЗС определяется векторами \mathbf{S} , $\mathbf{S}_{\text{БЛА}}$ и вектором СКО оценки ПП $\sigma_{\Delta R} = [\sigma_{\Delta R,1}, \sigma_{\Delta R,2}, \dots, \sigma_{\Delta R,N}]^T$, не зависит от координат КА-ретранслятора $\mathbf{S}_{\text{КА}}$ и может быть найдена с применением выражений (15)–(18). Несмотря на то, что матрица $\mathbf{J}_{\hat{\mathbf{S}}}$ содержит всю информацию о распределении оценок координат ЗС, наибольший интерес для потребителя представляет область пространства, соответствующая нахождению ЗС с заданной вероятностью. Для ее отыскания может быть использована методика построения эллипсоида ошибок [15], которая позволяет перейти от матрицы Фишера к параметрам эллипсоида ошибок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью иллюстрации результатов применения разработанного метода проведено моделирование в среде Matlab. В качестве показателя точности, обозначенного на рис.4 изолиниями, выступает размер большой полуоси эллипсоида ошибок, полученного из матрицы Фишера (15), для вероятности нахождения внутри него ИРИ равной 0,95.

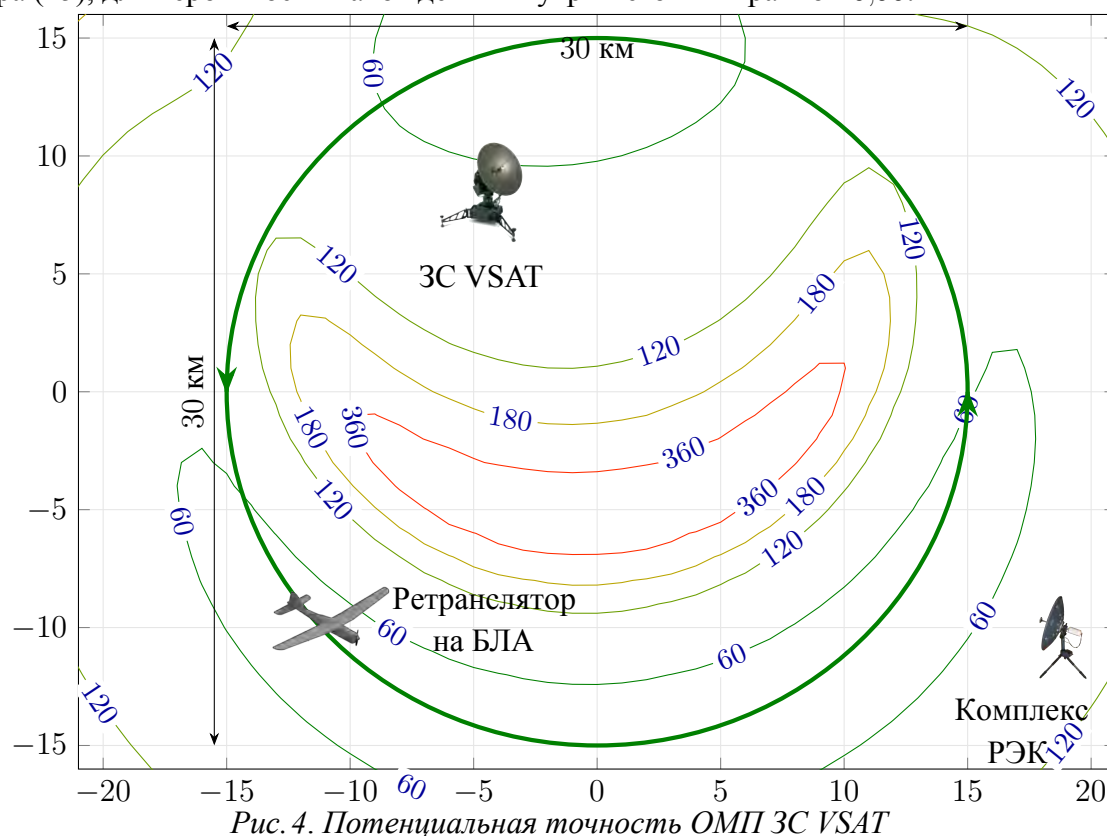


Рис. 4. Потенциальная точность ОМП ЗС VSAT

Ретранслятор на БЛА выполняет облет района предполагаемого нахождения ЗС VSAT нелегитимного пользователя ССС по окружности, совпадающей с центром топоцентрической системы координат, с радиусом равным 15 000 м и высотой 4 000 м. Комплекс РЭК расположен в точке с координатами $\mathbf{S}_{\text{РЭК}} = [18\ 867, -10\ 421, 0]^T$ м.

В качестве КА-ретранслятора выступает «Экспресс-АМУ1» (подспутниковая точка 36,1° в.д.). Координаты нелегитимно функционирующей ЗС равны $[-4\ 690, 8\ 473, 0]^T$ м, что соответству-

ет геодезическим координатам $59,97^\circ$ с.ш., $30,18^\circ$ в.д. Измерение КИП выполняется методом вычислительно-эффективного оценивания взаимной задержки [2] для ретранслированных сигналов ЗС с базой равной 10^5 . При этом вектор СКО оценок КИП $\sigma_{\Delta\tau} = [\sigma_{\Delta\tau,1}, \sigma_{\Delta\tau,2}, \dots, \sigma_{\Delta\tau,N}]^T$ получен методом, предложенным в работе [13], при условии нахождения ретранслятора на БЛА в каждой из $N = 100$ точек его маршрута, где были сделаны измерения КИП.

По результатам серии статистических испытаний, в ходе которой выполнялось определение местоположения ЗС разработанным методом, на рис.5 построена гистограмма погрешностей оценивания координат ЗС $R_n = \|\mathbf{S} - \tilde{\mathbf{S}}\|$.

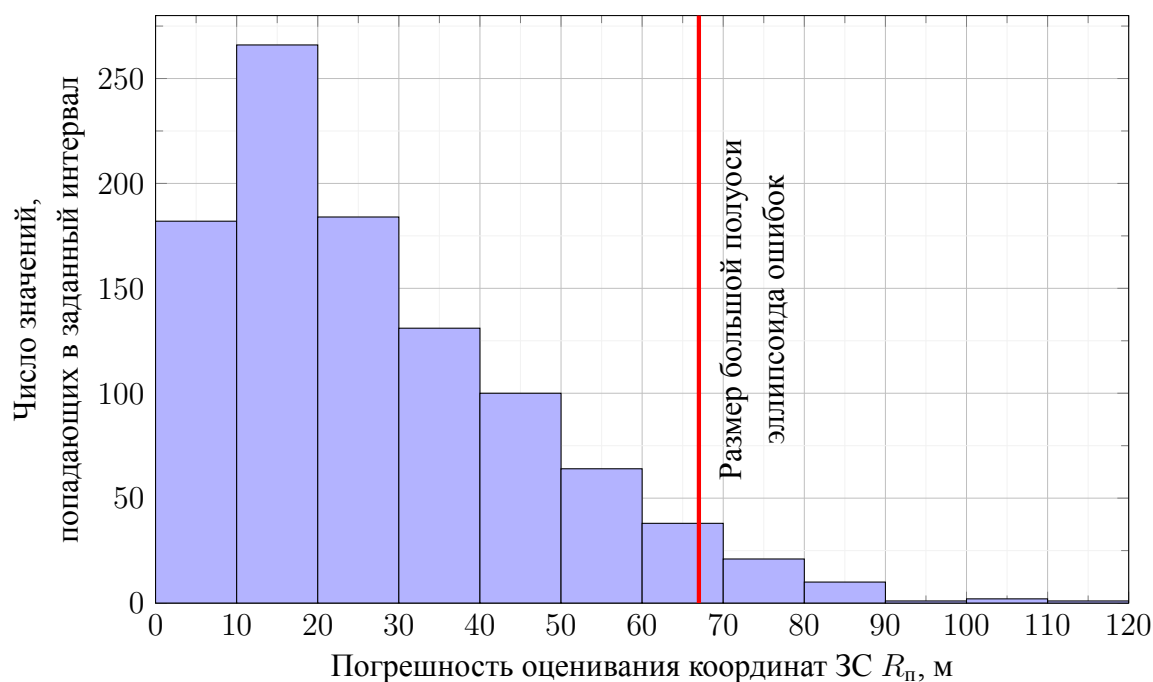


Рис. 5. Гистограмма погрешностей оценивания координат ЗС VSAT

Из графика, изображенного на рис.4, следует, что местоположению ЗС соответствует размер большой полуоси эллипсоида ошибок приблизительно равный 70 м. Это в полной мере согласуется с результатами серии из 1 000 статистических испытаний (рис.5) где погрешность оценивания координат ЗС R_n с вероятностью 0,95 не превышает 70 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разработанного метода ОМП ЗС ССС позволяет вычислять координаты ЗС в условиях априорной неопределенности относительно местоположения КА-ретранслятора на ГСО. В отличие от известных методов ОМП ЗС [10, 11], в качестве параметра положения используется псевдодальность, полученная на основе оценивания взаимной задержки сигналов ЗС, ретранслированных через КА и БЛА.

Полученные выражения для потенциальной точности ОМП (15) – (18) позволяют сделать вывод о том, что дисперсия оценок координат ЗС определяется местоположением БЛА (в моменты измерения КИП), ЗС, а также СКО оценок ПП, и не зависит от местоположения КА-ретранслятора.

При радиомониторинге с применением разработанного метода в районе размером 30 на 30 км погрешность ОМП ЗС VSAT на большей его части не превышает сотни метров, что подтверждается аналитическими расчетами, а также результатами статистических испытаний при имитационном моделировании в среде Matlab. При этом достигается точность соизмеримая с той, которая обеспечивается с применением разностно-дальномерного метода ОМП ЗС [11], требующего наличия априорных данных о местоположении КА-ретранслятора на ГСО.

Список используемых источников

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Р.В. Бакитько, Н.Т. Болденков, В.В. Булавский и др.; под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
2. Еремеев И.Ю., Овчаренко К.Л. Метод вычислительно-эффективного оценивания взаимных временных задержек в условиях априорной неопределенности частотных сдвигов сигналов спутниковых терминалов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 651. – С. 98–105.
3. Пространственно-поляризационная обработка радиосигналов при пеленговании источников радиоизлучения с беспилотного летательного аппарата / С.В. Богдановский, А.Н. Симонов, С.Ф. Теслевич, З.Ф. Шайдулин // Научные технологии. – 2015. – Т. 16, № 12. – С. 50–55.
4. Овчаренко К.Л. Алгоритм расчета координат источника радиоизлучения дальномерным методом при однопозиционных измерениях с систематической ошибкой // Телекоммуникации. – 2014. – № 6. – С. 6–13.
5. Овчаренко К.Л. Определение координат источников радиоизлучения дальномерным методом на базе однопозиционного подвижного измерителя // Телекоммуникации. – 2013. – № 10. – С. 27–34.
6. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 624 с.
7. Богдановский С.В., Симонов А.Н., Теслевич С.Ф. Поляризационный метод пеленгования источников радиоизлучения в пространстве // Научные технологии. – 2016. – Т. 17, № 12. – С. 40–43.
8. Богдановский С.В., Овчаренко К.Л., Симонов А.Н. Метод определения координат источников радиоизлучения на основе поляризационных измерений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 657. – С. 38–43.
9. Богдановский С.В., Симонов А.Н., Севидов В.В. Поляризационный способ определения ориентации БЛА // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – С. 15–19.
10. Пат. 2583450 Российская Федерация, МПК: G01S13/46 № 2015113856/07. Способ определения местоположения наземного источника радиоизлучения системы спутниковой связи / И.А. Маренков, Д.Л. Бережных, И.Ю. Голиков, В.В. Печурин. – Заявл. 14.04.2015; Оpubл. 10.05.2016. – 7 с.
11. Разностно-дальномерный метод определения местоположения земных станций спутниковых систем связи с применением ретранслятора на беспилотном летательном аппарате / К.Л. Овчаренко, И.Ю. Еремеев, К.В. Сазонов и др. // Труды СПИИРАН. – 2019. – 2018. – № 6. – С. 90–116.
12. Замарин А.И., Еремеев И.Ю., Овчаренко К.Л. Сравнительный анализ подходов к оцениванию задержки сигналов в условиях априорной неопределенности взаимного частотного сдвига // Естественные и технические науки. – 2017. – № 2. – С. 126–130.
13. Овчаренко К.Л. Потенциальная точность оценивания задержки сигналов при наличии частотного рассогласования на основе вычисления взаимной корреляционной функции модифицированных комплексных огибающих // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 7. – С. 39–44.
14. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions / Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E. // SIAM Journal of Optimization. – 1998. – № 1. – Pp. 112–147.
15. Методика построения эллипсоида ошибок для оценивания точности определения местоположения земных станций систем спутниковой связи с применением беспилотного летательного аппарата / К.Л. Овчаренко, И.Ю. Еремеев, Ю.Н. Гайчук, П.Е. Петухов // Научные технологии. – 2017. – Т. 18, № 11. – С. 22–26.

К.В. Сазонов,
доктор техн. наук;
М.В. Татарка,
кандидат техн. наук;
Ф.Л. Шуваев,
адъюнкт

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СОБЫТИЙ НА БАЗЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ СУФФИКСНЫХ ДЕРЕВЬЕВ

В статье рассматривается структурно-статистический подход к анализу символьных последовательностей. Представлена модель, позволяющая сегментировать повторяющиеся подпоследовательности и рассчитывать их вероятностные свойства в интересах прогнозирования и распознавания случайных временных рядов. Данная модель может применяться во многих областях современной науки и техники, в том числе в военной сфере при прогнозировании развития событий.

Ключевые слова: вероятностное суффиксное дерево, марковская цепь, условная вероятность, сегментация.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ последовательностей событий применяется во многих отраслях науки и техники, включая информационные технологии и интеллектуальный анализ данных. При обнаружении закономерностей в таких последовательностях можно с некоторой долей вероятности предсказывать появление событий в будущем, что позволяет принимать наиболее вероятные прогнозы. Сегментация последовательностей событий анализируемой информационной системы позволяет выделять повторяющиеся группы событий, формировать на их основе эталонные описания возможных состояний системы и определять режим ее работы. Помимо этого, в последнее время активно применяются методы символьной аппроксимации временных рядов [1]. Полученные после такого преобразования символьные временные ряды представляют собой ни что иное, как последовательность символов, в которой становится возможным выделение подпоследовательностей, а, следовательно, тренда и сезонных компонент. Существует несколько подходов к анализу символьных последовательностей. В основе их лежит использование вероятностных свойств последовательностей, например, исследования частотно-вероятностных свойств [2]. Вероятностные свойства таких последовательностей описываются при помощи марковских цепей конечной длины. В статье рассматривается модель представления последовательностей событий на базе специальной структуры, называемой вероятностным суффиксным деревом (ВСД).

Рассмотрим цепь Маркова. Последовательность дискретных случайных величин $x_l = \langle x_1, x_2, \dots, x_l \rangle$ длины l является набором символов из алфавита A . Индексы от $1, \dots, l$ являются номерами символов в алфавите. Рассмотрим последовательность $x_{<l>}$, как последовательность реализаций условных вероятностей:

$$P(x_{<l>}) = P(x_1) \times P(x_2 | x_1) \times P(x_3 | x_1 x_2) \times P(x_l | x_1 \dots x_{l-1}) \quad (1)$$

где $P(x_1), P(x_2 | x_1) \dots P(x_l | x_1 \dots x_{l-1})$ – последовательность условных вероятностей случайных величин x_1, x_2, \dots, x_l .

Основное свойство цепи Маркова заключается в том, что состояния каждого события в последовательности зависят от порядка цепи W прошлых состояний или x_{t-W}, \dots, x_{t-1} . Так марковская цепь первого порядка ($W=1$) принимает вид:

$$P(x_{\langle t \rangle}) = P(x_1) \times P(x_2 | x_1) \times P(x_3 | x_2) \times \dots \times P(x_t | x_{t-1}) \quad (2)$$

Марковская цепь глубины W приводится последовательностью длины $|A|^W \times |A|$ условных вероятностей $P(X_t = \sigma | X_{t-W}, \dots, X_{t-1})$, где $\sigma \in A$, называемых вероятностями перехода. Вероятности переходов из состояния в состояние порождают матрицу размерности $|A|^W \times |A|$, называемую матрицей вероятностей перехода. На рис. 1 изображена простейшая цепь Маркова, включающая три состояния и все возможные вероятности переходов между ними [3].

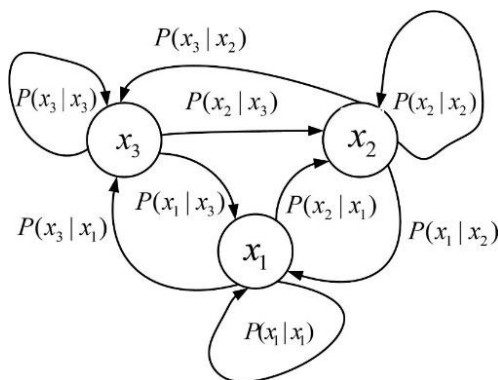


Рис. 1. Пример марковской цепи для трех состояний и вероятности переходов из состояния в состояние

В процессе этапа построения ВСД могут сегментироваться цепочки различной длины. В таком случае применяется математический аппарат марковских цепей переменной длины (МЦПВ).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО СУФФИКСНОГО ДЕРЕВА

Контекст (C) – это цепочка, выделенная из последовательности непроеизводных символов x_1, \dots, x_{t-1} , где x – непроеизводный символ алфавита A , а x_{t-1} – символ предшествующий символу x_t , где t – порядковый номер символа в цепочке и $t \in [1, l]$, где l – длина всего предложения [4]. Для каждого отдельного контекста $C_{\langle k \rangle} = c_1, \dots, c_k$ существует глубина построения дерева W , $0 \leq W \leq k$ (где k – количество контекстов c и $W = l - 1$, $\sigma \in A$) такой что его условная вероятность равна выражению:

$$P(\sigma | c_1, \dots, c_k) \approx \hat{P}(\sigma | c_{k-W}, \dots, c_k), \quad (3)$$

где \hat{P} – вероятность того, что контекст c входит в цепочку $\sigma \in A$.

Суффикс (suf) – это комбинация в контексте, извлекаемая справа налево и состоящая из символов на один меньше, чем в контексте.

В качестве примера рассмотрим суффиксы контекста $C = \text{"banana"}$:

$$suf(c_{\langle 5 \rangle}) = "anana",$$

$$suf(c_{\langle 4 \rangle}) = "nana",$$

$$suf(c_{\langle 3 \rangle}) = "ana",$$

$$suf(c_{\langle 2 \rangle}) = "na",$$

$$suf(c_{\langle 1 \rangle}) = "a".$$

Для контекста $C_{\langle k \rangle} = c_1, \dots, c_k$ условная вероятность $\text{suf}(c_{\langle k \rangle})$ оценочно равна условной вероятности контекста и рассчитывается выражением [2]:

$$\hat{P}(x | c_{\langle k \rangle}) \approx \hat{P}(x | \text{su}f(c_{\langle k \rangle})) \text{ при } x \in A, \text{ где } \text{su}f(c_{\langle k \rangle}) = c_2, \dots, c_k. \quad (4)$$

Уровень поддержки (Y_{\min}) – минимальное количество вхождений контекста c в последовательность (частота вхождений). При анализе последовательностей эта характеристика имеет важное значение для времени обработки данных и расчета их вероятностных свойств.

Глубина построения дерева (W) – это полученная при построении ВСД длина максимальной цепочки, которую можно описать при помощи марковской цепи переменного порядка (МЦПП).

Узел (n) – составной элемент дерева, соответствующий объекту некоторой фиксированной природы. Узел может быть:

- корневым – самый верхний узел дерева, обозначается символом e ;
- терминальным – конечный символ, т.е. не имеющий потомков;
- внутренним – любой узел дерева, имеющий потомков.

Узлы по отношению друг к другу могут быть узлами-потомками (младшими), либо корневыми (старшими).

На рис. 2 представлено ВСД и основные определения, используемые при его построении.

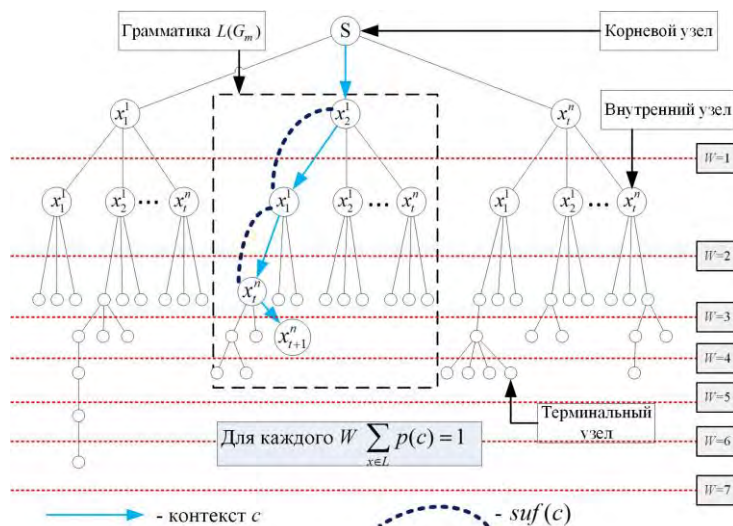


Рис. 2. Описательная модель вероятностного суффиксного дерева

Рассмотрим алгоритм построения вероятностного суффиксного дерева [5].

1. Исходная последовательность анализируется для определения вероятности каждого символа.
2. Каждый символ с ненулевой вероятностью становится дочерним узлом корневого узла и для каждого такого узла исходный образец анализируется заново для определения вероятности следующего символа.
3. Рекурсивно добавляются новые уровни, путем анализа каждого конкретного узла. Определяется, необходимо ли создавать новые узлы-потомки.
4. Информация о предшествующих символах запоминается, так как они могут появиться как предыдущие состояния.
5. Узел добавляется только тогда, если подпоследовательность символов, относящихся к узлу, находится в исследуемом исходном образце и если для него существует ненулевая вероятность.
6. Глубина подпоследовательности может быть изменена на максимально возможную или по умолчанию равна длине входного исходного образца.
7. Удаляются узлы, содержащие такую же статистическую информацию (вероятности), как и их родители. Этим устраняется избыточность структуры дерева. Такой процесс называется прунингом (от англ. «prune» – удаление) и рассмотрено в работе [5].
8. Устанавливается уровень поддержки каждого суффикса. Это минимальное количество вхождений его в последовательность.

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО СУФФИКСНОГО ДЕРЕВА ПО ЗАДАННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрим символьную последовательность a-b-a-a-b-a-a-b-b-b-b-a-b-a-b-b-a-a-b-a-b-b-b. Подсчитаем количество вхождений каждого символа в подпоследовательности и оценки вероятности появления каждого символа (табл. 1).

Таблица 1

Пункт 1 алгоритма			
Параметр	a	b	Всего
Частота(σ)	13	14	27
Оценка вероятности(\hat{P})	0.48	0.52	1

Рассчитаем суффиксы длины $W=2$ вероятности переходов для двух символов $\hat{P}(\sigma|a)$ и $\hat{P}(\sigma|b)$, $\sigma \in \{a, b\}$ (табл. 2). При расчетах исключим последний символ последовательности b, для выравнивания количества пар символов.

Таблица 2

Вероятности переходов для двух символов			
Символы	a	b	Всего
a	0,3846	0,6154	13
b	0,5385	0,4615	13

Рекурсивно будем добавлять новые узлы дерева и рассчитывать условные вероятности для суффиксов длиной $W=3$ (табл. 3).

Таблица 3

Вероятности переходов для трех символов

Символы	a	b	Всего
a-a	0,2000	0,8000	5
a-b	0,6250	0,3750	8
b-a	0,5714	0,4286	7
b-b	0,4000	0,6000	5

Для анализируемой последовательности рекурсивно рассмотрены все варианты суффиксов (рис. 3), рассчитаны условные вероятности появления подпоследовательностей всей возможной длины. Процесс построения ВСД может регулироваться двумя характеристиками: глубиной построения дерева W и уровнем поддержки подпоследовательностей Y_{min} . Уровень поддержки представляет задаваемое минимальное количество вхождений подпоследовательности в последовательность. При анализе последовательностей большого размера эти характеристики имеют важное значение для времени и точности обработки данных.

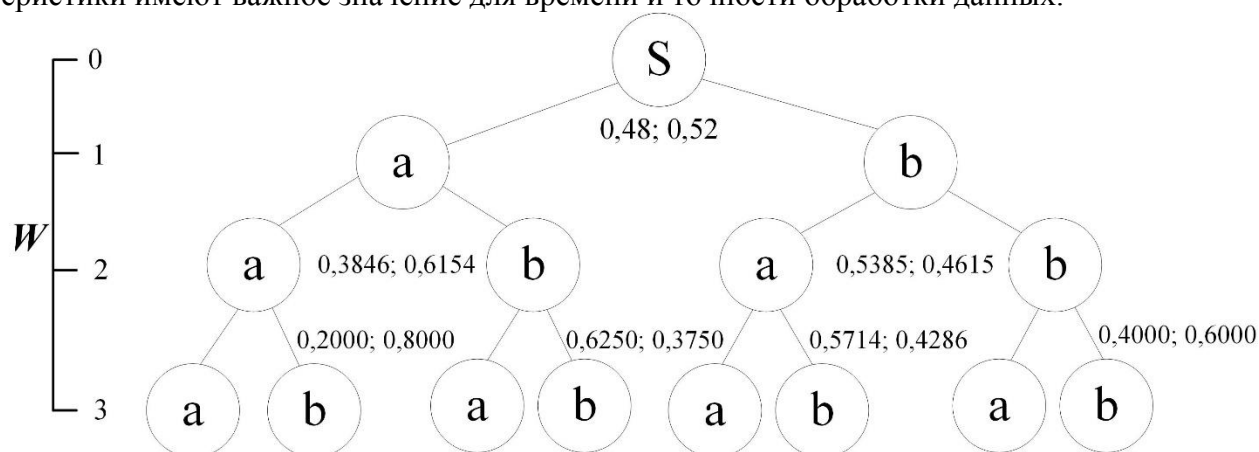


Рис. 3. ВСД, построенное по последовательности
a-b-a-a-b-a-a-b-a-a-b-b-b-a-b-a-b-b-a-a-a-b-a-b-b-b

Сегментированные последовательности событий на этапе обучения системы с помощью ВСД необходимо разместить в базе эталонных описаний для дальнейшей классификации поступающих данных. При этом наилучшим образом для хранения эталонов подходит база, организованная по принципу хэш-таблиц. Хэш-таблицы представляют собой эффективные структуры данных для реализации словарей. Они позволяют хранить пары (ключ, значение) и выполнять три операции: добавление новой пары, поиск и удаление ключа. Выигрыш при использовании хэш-таблиц заключается в том, что не требуется хранить все повторяющиеся суффиксы, а лишь описывающие их значения. Табл. 4 представлена в виде хэш-таблицы, для двух суффиксов последовательности a-b-a-a-b-a-a-b-a-a-b-b-b-a-b-a-b-b-a-a-a-b-a-b-b-b.

Таблица 4

Пример хранения данных в виде хэш-таблицы

Ключ	Значения			
	Суффикс	Положение в слове	Время появления	Вероятность появления
1	aaa	19	14:40	0,200
2	aab	3, 6, 9, 20	14.45, 14.50, 14.55, 15.30	0.800

После анализа последовательности с помощью ВСД и формирования базы эталонов становится возможно применять ее в качестве обучающей выборки для предсказания последующих событий и распознавания происшедших.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена модель представления событий на базе ВСД. Показаны положения теории вероятности, лежащие в основе модели. Поэтапно рассмотрен алгоритм построения ВСД и продемонстрировано его применение на практическом примере. Представленная в статье модель ВСД находит широкое применение в структурном распознавании образов [7] на этапах восстановления грамматики и синтаксического анализа, что подтверждено проведенными исследованиями, описанными в труде [8].

Список используемых источников

1. *Malinowski S., Guyet T.* 1d-SAX: a Novel Symbolic Representation for Time Series // Centre de Recherche INRIA. Rennes Bretagne Atlantique, France. – 2012. – 93 p.
2. *Gabadinho A., Ritschard G.* Analyzing State Sequences with Probabilistic Suffix Trees: The PST R Package. Journal of statistical software. – 2016. – №72. – 72 p.
3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.
4. *Гасфилд Дэн* Строки, деревья и последовательности в алгоритмах. – СПб.: Невский Диалект, БХВ-Петербург, 2003. – 654 с.
5. *Сазонов К.В., Татарка М.В., Шуваев Ф.Л.* Метод сокращения размерности вероятностных суффиксных деревьев // Информация и космос. – 2018. – № 3. – С. 55–61.
6. *Петер Флах* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
7. *Фу К.* Структурные методы в распознавании образов. – М.: Мир, 1977. – 320 с.
8. *Сазонов К.В., Татарка М.В., Шуваев Ф.Л.* Метод структурного статистического распознавания режимов работы информационно-вычислительных сетей // Информация и космос. – 2019. – № 1. – С. 40–47.

А.А. Чувиров

СПОСОБ КОНТАКТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В НЕОСВЕЩЕННЫХ В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ РАЙОНАХ

Для организации инструментальных метеорологических наблюдений в неосвещенных в метеорологическом отношении районах, т.е. там, где отсутствует возможность производства наблюдений за погодой, например, горные районы, северные регионы России, а также районы чрезвычайных ситуаций, где требуется проведение поисковых или спасательных операций, необходимы модели и методы, которые позволят получать информацию о фактическом пространственном распределении метеорологических параметров в указанных районах.

В статье предлагается научно-технический подход для решения задачи оперативного получения фактических метеорологических данных в неосвещенных в метеорологическом отношении районах.

Ключевые слова: метеорологическая информация, радиозонд, параметры ветра.

ВВЕДЕНИЕ

Информация о ветре и его параметрах: турбулентности, порывах, сдвигах и градиентах ветра, чрезвычайно важна для большого числа потребителей, начиная от метеослужб аэропортов и заканчивая простыми людьми, которые планируют выйти из дома. В настоящее время самые распространенные средства измерений ветра – анемометры и анеморумбометры, которые устанавливаются на мачтах различной высоты. Но эти измерения имеют контактный характер и не позволяют получить профиль ветра по высоте или его основные характеристики.

Другой распространенный тип приборов – радиозонды, которые используют поднимающуюся оболочку с измерительными приборами, наполненную водородом или гелием. Регистрируя с помощью радиолокатора положение оболочки в пространстве в различные моменты времени (или положение оболочки и доплеровскую частоту за счет ее движения), определяют скорость ветра на различных высотах [1]. Радиозондирование до сих пор в мире является основным средством определения вертикального профиля ветра, но низкая стационарная плотность сети аэрологических станций приводит к тому, что в имеются районы, в которых отсутствует возможность инструментальных измерений вертикального профиля атмосферы. Так, например, на сегодняшний день в России функционирует всего 114 аэрологических станций, основная масса которых расположена в европейской части страны. В результате северные регионы Сибири, Дальний Восток и побережье Северного Ледовитого океана являются малоосвещенными с точки зрения фактической метеорологической информации [2].

Очевидно, что необходимая стационарная плотность сети наблюдений сегодня не может быть обеспечена из-за отсутствия явного экономического эффекта от ее реализации, или отсутствия обоснования, что такой эффект есть. В этом случае необходимо искать дополнительные источники информации, с одной стороны, эффективные, а с другой – наименее затратные из всех возможных.

С этой целью в статье автор предлагает один из таких источников метеорологической информации, им разработано новое измерительное устройство и получены оценки его движения в реальной атмосфере. Представляя способ контактного зондирования атмосферы разработанным кассетным метеорологическим зондом (КМРЗ), автор показывает место своих разработок в системе гидрометеорологического обеспечения.

КАССЕТНЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РАДИОЗОНД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для организации инструментальных измерений вертикальных профилей параметров атмосферы в неосвещенных в метеорологическом отношении районах необходимо понимать, с помощью каких существующих измерительных средств возможно получать информацию о параметрах атмосферы из этих районов, и как эти средства туда доставлять.

Анализ современных методов и средств метеорологических измерений показал, что наиболее подходящим средством по своим функциональным возможностям является метеорологический радиозонд [3, 4], но существующий способ применения метеорологического радиозонда не пригоден для реализации в труднодоступных районах. Поэтому автором предложен новый способ с помощью разработанного им устройства – кассетного метеорологического радиозонда.

При разработке КМРЗ за основу были взяты такие перспективные метеорологические радиозонды как МРЗ-3МК и АРЗ МРЗ-Н1, разработанные в УрФУ им. Первого президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург) и ОАО «Радий» (Челябинская обл., г. Касли) [3, 4]. Конструктивно КМРЗ представляет собой блок-кассету (рис.1,а) с расположенными внутри него радиозондами (рис. 1,б), которые отстреливаются в разные стороны после доставки блока-кассеты в район производства измерений. Радиозонды, помещаемые в блок-кассету, имеют обтекаемую форму, обеспечивающую плавный спуск. В верхней части корпуса радиозонда расположен отсек, в котором находится парашют с системой раскрытия. Датчики измерения параметров атмосферы, антенная система для передачи данных, блок радиотелеметрии и источник питания скомпонованы внутри корпуса. Также в корпусе имеются аспирационные отверстия, обеспечивающие обдув датчиков температуры и влажности.

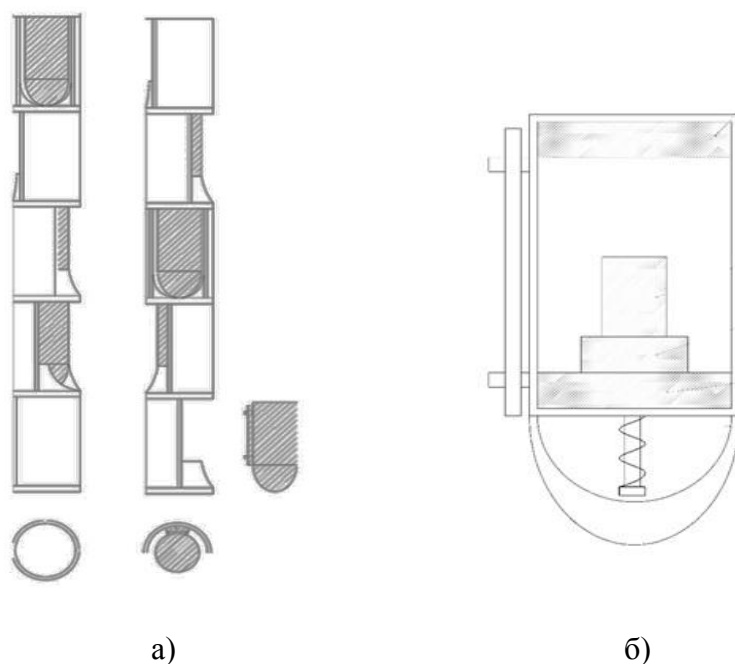


Рис. 1. Конструкция кассетного метеорологического радиозонда

Предложения по конструкции и функционированию КМРЗ оформлены в виде заявки на патент на полезную модель № 2017141464 от 18.11.17.

В качестве способа и средства доставки КМРЗ в труднодоступный район предлагается ракетный способ, на примере метеорологических ракет («Мера», «МН-300»), противогоревых ракет («Алазань», «Облако», «Кристалл», «Алан»), противолавинных ракет («Кызыл»), базирующихся на соответствующих реактивных комплексах («Дозор», «Элия») [5–7].

Обеспечение применения КМРЗ в различных метеорологических условиях требует знания характера движения КМРЗ в реальной атмосфере с учетом его тактико-технических характеристик и значений отклонений точки его падения от точки с заданными координатами. В этом случае при отсутствии возможности проведения серии натурных экспериментов, автор провел имитационное моделирование применения КМРЗ. Результаты моделирования характеризуют чувствительность параметров движения КМРЗ к вариациям параметров атмосферы.

МЕТОД УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ТРАЕКТОРИЮ ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ И КАССЕТНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЗОНДА

Оценивание влияния параметров атмосферы на траекторию движения КМРЗ основано на теории баллистического движения тел без учета влияния атмосферы и в реальной атмосфере.

При построении и исследовании траектории движения КМРЗ была выбрана параболическая теория, так как основные выводы, которые могут быть получены с ее помощью, оказываются применимы и для реальных траекторий движения тел. Например, параболическая теория широко используется при построении приближенных формул в теории поправок [9, 11].

При разработке метода приняты следующие допущения:

- 1) ракета и КМРЗ считаются материальными точками, что позволяет ограничиться составлением уравнений движения центра масс;
- 2) вес ракеты и вес КМРЗ принимаются постоянными;
- 3) начало системы координат при описании движения КМРЗ помещено в точку отделения зондов от ракеты.

Для реализации метода необходимы следующие исходные данные:

- 1) тактико-технические характеристики ракеты;
- 2) тактико-технические характеристики КМРЗ;
- 3) данные аэрологических наблюдений.

Для описания движения ракеты и КМРЗ использовались уравнения движения тела в пространстве без влияния атмосферы [8, 10] в проекциях на оси системы координат, после преобразования которых, получена система уравнений, описывающая траекторию движения центра масс ракеты в пространстве:

$$\begin{cases} \dot{X} = V_{0p} \cos \theta_0 \\ \dot{Y} = V_{0p} \sin \theta_0 - gt \end{cases}, \quad (1)$$

где V_{0p} – начальная скорость движения ракеты;
 \dot{X}, \dot{Y} – функции изменения координат положения ракеты вдоль траектории полета;
 g – ускорение свободного падения;
 t – время полета ракеты;
 θ_0 – угол стрельбы.

Далее рассматривается движение ракеты в атмосфере, поэтому используются соответствующие уравнения движения, описывающие плоское движение центра масс тела в нормальной артиллерийской атмосфере, с учетом сопротивления, оказываемого воздухом летящему телу [10]:

$$\begin{cases} \dot{V} = -0,474 c \frac{\Pi_0}{\Pi_{0N}} H(y) V_{0p}^2 c_x - g \sin \theta_0 \\ \dot{\theta} = -g \cos \theta_0 V_{0p}^{-1} \\ \dot{X} = \dot{V} \cos \dot{\theta} \\ \dot{Y} = \dot{V} \sin \dot{\theta} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\frac{\Pi_0}{\Pi_{0N}} H(y)$ – изменение плотности с высотой;
 \dot{V} – функция изменения горизонтальной скорости полета ракеты;
 \dot{X}, \dot{Y} – функции изменения координат положения ракеты вдоль траектории полета;
 $\dot{\theta}$ – функция изменения угла положения ракеты вдоль траектории полета;
 Π_0 – плотность воздуха в точке выстрела;
 Π_{0N} – нормальная плотность воздуха;
 θ_0 – угол стрельбы;
 g – ускорение свободного падения;
 c_x – коэффициент лобового сопротивления;
 c – баллистический коэффициент;
 V_{0p} – начальная скорость движения ракеты

$$V_{0p} = k_0 t_{\text{напр}} , \quad (3)$$

где k_0 – коэффициент скорости;
 $t_{\text{напр}}$ – время прохождения ракеты в направляющих пусковой установки;

$$k_0 = \frac{R}{m_0} - g \sin \theta_0 - f_{\text{тр}} g \cos \theta_0 , \quad (4)$$

где R – реактивная тяга двигателя;
 m_0 – масса ракеты;
 θ_0 – угол стрельбы;
 $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения в направляющих пусковой установки.

Для описания движения КМРЗ, т.е. движения падения тела, использованы уравнения движения падающего тела [8–12], в предположении, что на КМРЗ действуют силы тяжести и сопротивления воздуха, т.е. лобового сопротивления, а начальная скорость движения выражена через импульс, который получают зонды в момент их отстрела от ракеты:

$$\begin{cases} V_0 = \frac{P}{m} + V_p \\ \dot{X} = V_0 \cos \theta_0 \\ \dot{Y} = gt + V_0 \sin \theta_0 \end{cases} , \quad (5)$$

где P – импульс;
 g – ускорение силы тяжести;
 V_0 – скорость движения зондов;
 θ_0 – угол отстрела зондов;
 t – время движения (падения) зондов;
 m – масса одного зонда в КМРЗ;
 V_p – скорость ракеты в момент отстрела зонда.

Дифференциальные уравнения баллистического движения тела в воздухе не интегрируются в аналитическом виде, их можно решить только численно. Для решения этой задачи был использован алгоритм Рунге-Кутты, реализованный в математическом пакете Mathcad.

Для учета и дальнейшего оценивания влияния параметров атмосферы на полет ракеты и КМРЗ используются уравнения, описывающие изменение дальности полета тела (далее – ΔX) и отклонение его траектории в сторону от плоскости XOY (далее – ΔZ), вызванные влиянием параметров атмосферы (рис. 2) [11, 12].

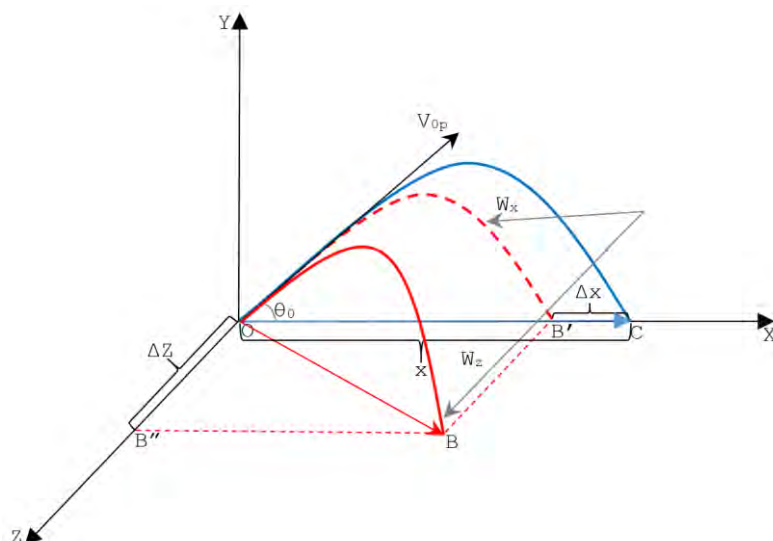


Рис. 2. Иллюстрация продольного ΔX и бокового ΔZ отклонений движения ракеты (КМРЗ) от нормальной траектории в реальной атмосфере

Так, для расчета бокового и продольного отклонений ракеты и КМРЗ, вызванных влиянием ветра, используются следующие уравнения:

$$\Delta Z = W_z \left[(t - t_i) - \frac{X - x_i}{v_0 \cos \theta_0} \right], \quad (6)$$

где ΔZ — боковое отклонение ракеты и КМРЗ за время t ;
 W_z — боковая составляющая ветра;
 X — дальность по оси X ;
 x_i — длина пути, проходимая телом по оси X в i -ом слое;
 t — время полета ракеты и КМРЗ;
 t_i — время полета ракеты и КМРЗ в i -ом слое;
 v_0 — начальная скорость полета ракеты, зондов;

$$\Delta X = W_x \left[(t - t_i) - \lambda_1 + \lambda_2 \frac{\tan \theta_i}{v_0 \cos \theta_0} \right], \quad (7)$$

где ΔX — продольное отклонение тела за время t ;
 W_x — продольная составляющая ветра;
 λ_1 и λ_2 — параметры, зависящие от функции сопротивления;
 θ_0 — угол стрельбы ракетой, отстрела зондов;
 θ_i — угол, составляемый горизонтальной плоскостью i -го слоя и вектором скорости тела в i -ом слое;
 t — время полета ракеты и КМРЗ;
 t_i — время полета ракеты и КМРЗ в i -ом слое;
 v_0 — начальная скорость полета тела.

Изменение дальности полета зонда, вызванное изменением атмосферного давления, описывается уравнением:

$$\Delta X = - \frac{\Delta P_0}{747,6} \left(1 - \frac{\tan \theta_0}{\tan \theta_c} \right), \quad (8)$$

где ΔX — продольное отклонение ракеты и КМРЗ за время t ;
 ΔP_0 — изменение давления;
 θ_0 и θ_c — углы, составляемые горизонтальной плоскостью и вектором скорости тела соответственно в точках вылета и падения.

Изменение дальности полета тела, вызванное изменением температуры воздуха, описывается уравнением

$$\Delta X = - \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \theta_0}{\operatorname{tg} \theta_c} \right) * \left(\frac{1}{R\gamma} - 1 \right) \frac{\Delta \tau}{\tau}, \quad (9)$$

где ΔX – продольное отклонение ракеты и КМРЗ за время t ;
 γ – вертикальный температурный градиент;
 R – универсальная газовая постоянная;
 θ_0 и θ_c – углы, составляемые горизонтальной плоскостью и вектором скорости тела соответственно в точках вылета и падения;
 $\Delta \tau$ – изменение виртуальной температуры;
 τ – виртуальная температура

$$\tau = T(1 + 0,6q), \quad (10)$$

где T – абсолютная температура;
 q – удельная влажность.

Таким образом, приведено математическое описание предложенного метода учета влияния параметров атмосферы на траекторию движения ракеты и КМРЗ.

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ТРАЕКТОРИЮ ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ И КАССЕТНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЗОНДА

Для оценивания влияния параметров атмосферы на траекторию движения ракеты и сносы КМРЗ были проведены численные эксперименты, суть которых заключалась в моделировании полета ракеты до точки вскрытия блок-кассеты, с дальнейшим отстрелом и полетом КМРЗ с учетом влияния атмосферы, а также в сравнении полученных результатов с результатами моделирования без учета влияния атмосферы. Так как при разработке метода использовались уравнения баллистики, применяемые в артиллерии, то при оценивании была применена Нормальная артиллерийская атмосфера (НАА), которой соответствуют следующие значения метеорологических параметров [10–12]:

- температура воздуха у земли $+15^0 \text{C}$;
- виртуальная температура у земли $+15,9^0 \text{C}$ ($288,9^0 \text{K}$);
- виртуальная температура на высотах от 12000 м принята постоянной $-221,5^0 \text{K}$;
- относительная влажность на всех высотах равна 50%;
- давление воздуха на стартовой позиции – 750 мм рт. ст.

Разработанный метод считался адекватным если продольные и боковые составляющие отклонений зондов, при использовании НАА, относительно осей ОХ и ОУ имели нулевые значения, а координаты падения зондов в НАА совпадали с координатами, полученными для каждого зонда при моделировании без учета влияния атмосферы.

При проведении экспериментов использовались следующие условия:

- дальность исследуемого района 90 км;
- высота отстрела зондов 10,5 км;
- масса каждого зонда 0,5 кг;
- начальная скорость движения для зондов 1, 2 и 3 составляет 60, 70 и 80 м/с соответственно;
- углы отстрела для зондов 1, 2 и 3 равны 50^0 , 40^0 и 30^0 соответственно;
- район гарантированных значений данных радиозондирования для КМРЗ 12,5 км;
- метеорологические условия приняты постоянными и соответствуют НАА.

В процессе проведения экспериментов получены результаты, представленные на рис. 3.

При нормальных метеорологических условиях отсутствует смещение зондов вдоль осей ОХ и ОУ, что говорит об адекватности разработанной модели. Разброс зондов в данном случае зависит от начальных условий полета и происходит только вдоль оси ОХ, т.е. вдоль направления стрельбы.



а)



б)

*Рис. 3. Иллюстрация результатов моделирования:
а – без учета влияния атмосферы; б – при нормальных артиллерийских условиях*

Для получения оценок зависимости параметров движения ракеты и КМРЗ от параметров реальной атмосферы проведено моделирование применения зондов по данным метеорологических станций в географических районах, отличающихся своей орографией (равнины, горная местность, прибрежные районы): Мурманск (станция 22113);

Санкт-Петербург (станция 26063); Волгоград (станция 34467); Владикавказ (37259); Петропавловск-Камчатский (станция 32540); Берген (станция 10238).

В качестве исходных данных использовались ежесуточные данные радиозондирования атмосферы за 2017 год, в сроки 12 и 24 ч. Имитация вскрытия блок-кассеты (начало движения зондов) производилась на высотах 6,5; 10,5; 15 и 20 км.

Для примера, на рис. 4 представлены результаты моделирования по данным двух станций: Волгоград (станция 34467) и Владикавказ (37259) за 30 декабря 2017 года, высота отстрела зондов 10,5 км.

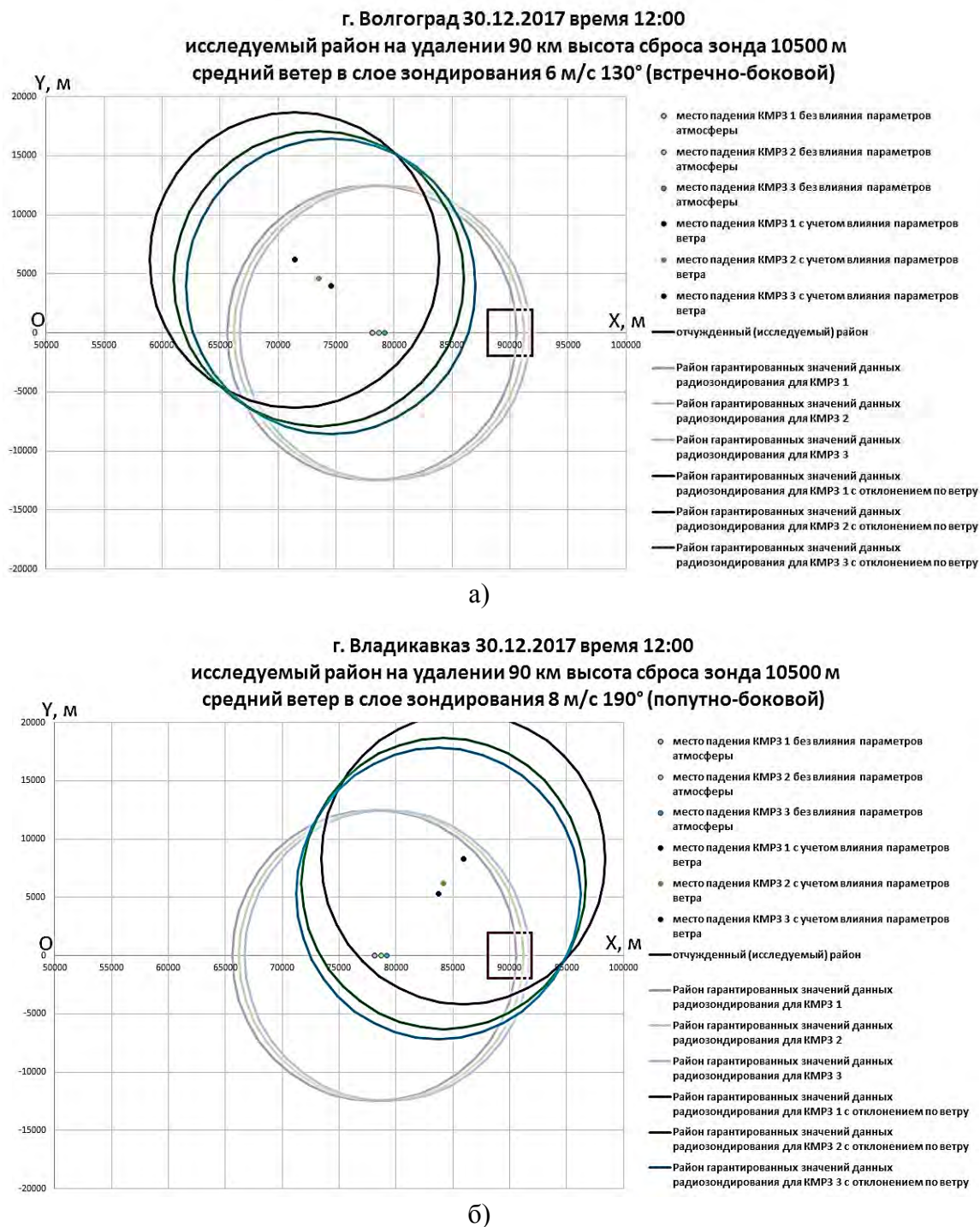


Рис. 4. Результаты моделирования сносов КМРЗ:

а – по данным станции г. Волгограда; б – по данным станции г. Владикавказа

Всего для каждого исследуемого района произведено более 2900 циклов моделирования применения КМРЗ.

В ходе анализа полученных результатов выявлено, что изменения температуры и давления оказывают незначительное влияние на характер полета зондов и при расчете суммарных отклонений вносят небольшой вклад (табл. 1, 2).

Таблица 1

Таблица зависимости дальности полета ракеты и КМРЗ от изменения температуры

Величина изменения температуры от значений НАА $\pm \Delta T$, °C	1	10	20	30	40
Продольное отклонение КМРЗ, м	1,6	13,6	36,8	61,2	105,5

В табл. 1 представлены результаты расчетов изменения дальности полета тела при изменении температуры воздуха на 1, 10, 20, 30 и 40°С от значения температуры НАА.

Таблица 2

Таблица зависимости дальности полета ракеты и КМРЗ от изменения давления

Величина изменения давления от значений НАА $\pm \Delta P$, мм. рт. ст.	10	20	30	40	50
Продольное отклонение КМРЗ, м	3,2	5,6	8,1	16,0	37,8

В табл. 2 представлены результаты расчетов изменения дальности полета тела при изменении атмосферного давления на 10, 20, 30, 40 и 50 мм. рт. ст. от значения давления НАА.

Иначе обстоит дело с влиянием ветра (см. рис. 4 и табл. 3).

На рис. 4 представлены результаты моделирования оценивания влияния скорости и направления ветра на полет ракеты и КМРЗ в сравнении с моделированием полета ракеты и КМРЗ без учета влияния атмосферы. В табл. 3 представлены обобщенные оценки сносов КМРЗ, полученные в результате оценивания влияния параметров ветра по выбранным станциям.

Полученные оценки характеризуют сносы зондов при различных параметрах ветра и могут использоваться для расчета поправок при стрельбе ракетами, снаряженными КМРЗ, например, в многоцелевой ракетной системе контроля погоды «Дозор».

Таблица 3

Оценки сносов КМРЗ вследствие влияния ветра, м

слой зондирования, м		h=6500									
средний ветер в слое зондирования, м/с		0-1		2-5		6-10		11-15		>16	
отклонение КМРЗ, м		продольное		боковое		продольное		боковое		продольное	
средний ветер в слое зондирования		продольное		боковое		продольное		боковое		продольное	
встречный		219,0	202,0	1807,4	2103,8	4903,8	5233,0	8164,4	8540,4	14068,5	14658,8
встречно-боковой		427,4	345,6	1879,6	2006,6	5042,9	5204,3	8333,1	8669,3	13429,5	14014,1
попутный		679,3	355,2	2675,5	2461,4	5272,7	5080,9	8472,7	8243,3	12989,6	13110,7
попутно-боковой		680,3	398,2	2071,0	1968,2	4993,8	5035,9	8615,7	8709,0	13698,5	13580,8
слой зондирования, м		h=10500									
средний ветер в слое зондирования, м/с		0-1		2-5		6-10		11-15		>16	
встречный		397,7	423,7	2370,2	2628,2	5822,0	6290,5	9655,2	10187,9	15692,5	16525,0
встречно-боковой		592,9	415,1	2149,9	2352,3	5830,6	6142,9	9678,2	10168,2	14853,8	15664,6
попутный		866,3	461,5	3178,8	2965,5	6070,4	5916,2	9834,7	9693,0	15343,9	15551,0
попутно-боковой		859,3	483,3	2607,3	2404,8	6023,5	5892,6	9990,0	9986,7	15742,6	15629,9
слой зондирования, м		h=15000									
средний ветер в слое зондирования, м/с		0-1		2-5		6-10		11-15		>16	
встречный		468,3	592,8	3487,7	3786,1	6624,3	7190,8	10441,5	11276,8	15454,9	16515,4
встречно-боковой		684,7	654,7	2391,1	2719,3	6139,0	6634,9	10324,8	11028,8	15322,4	16295,5
попутный		1354,7	622,0	3683,9	3335,5	7278,1	7171,2	11177,9	11031,0	17771,3	18016,6
попутно-боковой		943,7	666,2	2985,8	2565,1	6759,6	6479,2	10914,6	10899,1	17724,7	17948,4
слой зондирования, м		h=20000									
средний ветер в слое зондирования, м/с		0-1		2-5		6-10		11-15		>16	
встречный		525,5	751,3	3371,2	3816,0	6736,7	7531,3	10886,0	11861,3	16131,5	17443,9
встречно-боковой		747,6	802,9	2490,3	3093,6	6420,5	7133,6	10919,9	11905,4	15912,1	16670,8
попутный		1146,5	808,7	3866,7	3422,4	7480,3	7333,0	11948,5	11766,6	18573,4	18914,0
попутно-боковой		1195,4	756,2	3452,9	2913,3	7630,6	7271,6	11853,7	11958,2	17959,3	18464,2

Для проведения зондирования атмосферы с помощью КМРЗ в районах, неосвещенных в метеорологическом отношении, инженером-синоптиком по таблице сносов определяются

продольное и боковое смещения КМРЗ от расчетной зоны падения. Входом в таблицу являются: значение высоты вскрытия ракеты – слой зондирования, направление и скорость среднего ветра в слое зондирования. После определения продольного и бокового смещения инженер-синоптик определяет установки для стрельбы и высоту вскрытия ракеты с КМРЗ с таким расчетом, чтобы зонд попадал в расчетную точку падения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен новый научно-технический подход для решения задачи оперативного получения фактических метеорологических данных в неосвещенных в метеорологическом отношении районах. Основная идея состоит в разработке нового устройства – кассетного метеорологического зонда, и способа его применения.

Данный подход позволит осуществлять оперативный мониторинг метеорологических условий в неосвещенных в метеорологическом отношении районах без организации стационарной сети наблюдений, например, для организации воздушного движения вертолетов, легкомоторной и беспилотной авиации в таких районах, что обеспечит безопасность полетов, оптимальное планирование маршрутов и составление полетных заданий указанных воздушных судов.

Список используемых источников

1. РД 52.11.650–2003. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – Вып. 4: Аэрологические наблюдения на станциях, ч. 3: Температурно-ветровое зондирование атмосферы. – 312 с.
2. Основные обобщенные показатели функционирования аэрологической сети РФ за 2017 год / Центральная аэрологическая обсерватория (ФБГУ «ЦАО»). – СПб.: Гидрометеиздат, 2018. – С.110.
3. Киселев В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). – СПб.: Издание РГГМУ, 2004. – 426 с.
4. ОАО «Радий». – URL: <http://www.radiy.ru/> (дата обращения: 14.09.15).
5. Карпенко А.В. Современные реактивные системы залпового огня. – М.: Бастиян, 2003. – 76 с.
6. Библашвили Н.Ш., Бурцев И.И., Серегин Ю.А. Руководство по организации и проведению противогололедных работ. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 168 с.
7. Петрунин А.М. Перспективы применения неуправляемых ракет в борьбе с градом // Проектно-конструкторские и производственные вопросы создания перспективной авиационной техники: сб. / под ред. проф. Ю.Ю. Комарова. – М.: МАИ, 2009. – С. 304–313.
8. Бутенин Н.В., Луц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – СПб.: Лань, 2006. – Т. 2. – 730 с.
9. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика: учебник для технических вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 479 с.
10. Беляева С.Д. Математические методы анализа движения в воздухе неуправляемых артиллерийских снарядов и мин: (электронный учебник для адъюнктов). – СПб.: МВАА, 2016. – 111 с.
11. Кулаков А.А., Шталь В.А. Военная метеорология. – М.: Воениздат, 1940. – 288 с.
12. Паршин Ж.П., Чунаев Н.И., Логвин А.М. Внешняя баллистика. – МО СССР, 1984. – Ч. 1: Уравнения движения снарядов. – 387 с.

К.О. Гнидко,
доктор техн. наук;
А.О. Единархова;
С.А. Макаров;
А.С. Сергеев

АНАЛИЗ УГРОЗ КОГНИТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Предлагается результат анализа угроз когнитивных искажений информационно-психологического объекта контроля. В статье описаны когнитивные искажения, обусловленные несовершенством и неполнотой знаний, а также типы контаминации сознания и способы ее предотвращения.

Ключевые слова: когнитивные искажения, контаминация сознания.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие технологий воздействия на сознание человека позволило им окончательно выйти за пределы психологических лабораторий, они стали неотъемлемой частью окружающей реальности. Их применение можно видеть в прошедшей череде «арабских революций», действующем конфликте на Украине и зарождающемся кризисе в Венесуэле. С учетом попыток со стороны США оказания воздействия на индивидуальное и массовое сознание военнослужащих вооруженных сил Венесуэлы, с целью склонения их к предательству легитимных властей страны, сложно переоценить опасность, которую несет применение технологий воздействия на сознание против военнослужащих Вооруженных Сил Российской Федерации в целом и против обучающихся в высших военно-учебных заведениях как фундамента Вооруженных Сил Российской Федерации в частности. С целью недопущения манипулирования групповым и массовым сознанием и для эффективного противодействия ему необходимо глубокое и всестороннее исследование особенностей человеческой психики. Особое внимание необходимо уделить когнитивным искажениям, которые не зависят от религиозной, национальной и культурной принадлежности индивида.

КЛАССЫ КОГНИТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Все многочисленные проявления когнитивных искажений могут быть отнесены к двум классам, первый из которых характеризуется незнанием фундаментальных закономерностей бытия или неумением применять знания об этих закономерностях на практике, а также существованием отличий человеческой логики от математической (некоторые примеры когнитивных искажений первого класса далее будут перечислены в табл. 1, но их детальное описание не является предметом настоящей работы).

Ко второму классу когнитивных искажений относятся случаи, когда неосознаваемые или неконтролируемые психические процессы становятся причиной нежелательной реакции индивида. В рамках настоящей работы для обозначения данного класса ошибок будем использовать термин «контаминация сознания». Глагол «to contaminate», согласно английскому толковому словарю «Random House Dictionary» (1968), означает «становиться грязным или непригодным для употребления в результате контакта или смешивания с чем-либо нечистым, плохим и т. д.». Другими словами, при контаминации, в результате контакта системы с

некоторым потенциально вредоносным агентом, приемлемое состояние системы становится менее приемлемым (менее желательным). Причинами многих нежелательных психических процессов и вызванных ими ошибок считаются воздействия на сознание и подсознание со стороны внутренних или внешних агентов-контаминантов.

Таблица 1

Когнитивные искажения, обусловленные несовершенством и неполнотой знаний

№	Когнитивное искажение	Пример
1	Задача Уосона	Испытуемому предъявляются четыре карты и сообщается логическое правило, определенное для этих карт, истинность которого он должен проверить, переворачивая минимально необходимые карты. Эксперименты показали, что только 4% испытуемых осуществляют математически верный выбор [1]
2	Неверный силлогизм	Испытуемому предъявляются утверждения: «Все французы в этой комнате предпочитают пить вино», «Некоторые из пьющих вино в этой комнате являются гурманами». Затем испытуемого спрашивают: «Что следует из этих двух утверждений?» Многие делают вывод, что «некоторые французы в комнате являются гурманами», что неверно [2]
3	Неверное представление о понятии «случайность»	Испытуемых спрашивали, какое распределение выпадений монет более вероятно: «О-Р-О-Р-О» или «О-О-О-Р-Р-Р» (О – орел, Р – решка). Хотя обе цепочки событий статистически эквивалентны, испытуемые ошибочно полагают что первая, выглядящая более случайной по структуре, будет выпадать чаще [3]
4	Игнорирование априорной вероятности	Задача: «В городе 85% машин – синие, 15% – зеленые; свидетель аварии заявил на суде, что видел зеленую машину, но известно, что в темноте этот свидетель мог отличить синюю от зеленой лишь в 80% случаев. Какова вероятность того, что в аварию попала зеленая машина?» Оказалось, что эту задачу испытуемые решают, не учитывая априорные вероятности [3–5]
5	Сверхуверенность в выбранном	Показано, что после того, как испытуемые совершают выбор, они оценивают вероятность правильности своего выбора слишком высоко [6]

Контаминацию сознания определим более формально как явление, при котором индивид вследствие неконтролируемого или бессознательного психического процесса формирует нежелательное суждение, испытывает нежелательные эмоции или демонстрирует нежелательное поведение. Под «нежелательным» имеем в виду тот факт, что индивид, принимающий решение, сознательно не хотел бы подвергнуться воздействию, которое в конечном счете имело место и повлияло на его решение (далее приведенное определение будет расширено и дополнено).

Проводить аналогию контаминации сознания с физическим загрязнением полезно по нескольким причинам. Во-первых, практически невозможно сохранить «стерильность» сознания. При этом в реальной жизни вернуть загрязненную субстанцию в «чистое» состояние непросто, а зачастую – невозможно. Это является вполне подходящей метафорой и для ментальных процессов. Ряд причин не позволяет избежать контаминации сознания: сложность (а порой даже невозможность) обнаружения признаков протекания нежелательного ментально-

го процесса, неполнота знаний о законах функционирования сознания, ограниченная возможность контроля процессов, происходящих в сознании и подсознании.

Во-вторых, приведенная аналогия акцентирует внимание на тех способах, которые люди применяют, чтобы избежать когнитивных искажений. Мотивация, которая побуждает человека избегать физических загрязнений, сродни той, которая побуждает содержать в чистоте сферу психических процессов. Чтобы достоверно прогнозировать, является ли суждение индивида объективным или на него оказывает влияние предубеждение, необходимо понимать, какими приемами пользуются люди, чтобы защитить свою психику от нежелательных влияний. Например, чтобы понять, до какой степени люди подвержены воздействию рекламы, важно рассмотреть, какие шаги они предпринимают, чтобы избежать нежелательного воздействия (например, переключение канала на время рекламы). Очевидно, что люди, применяющие подобную тактику, в конечном счете менее подвержены рекламному воздействию.

ТИПЫ КОНТАМИНАЦИИ СОЗНАНИЯ

Главной целью настоящего исследования является разработка подходов к предупреждению и нейтрализации контаминации ментального пространства. Для этого необходимо более детально рассмотреть причины ее возникновения. Все проявления контаминации можно условно разделить на два типа. К первому типу относятся результаты некорректной автоматической обработки информации в сознании и подсознании индивида. Ко второму типу – последствия суперпозиции ментальных стимулов, порожденных суждениями, мышлением, памятью, ощущениями (рис. 1).

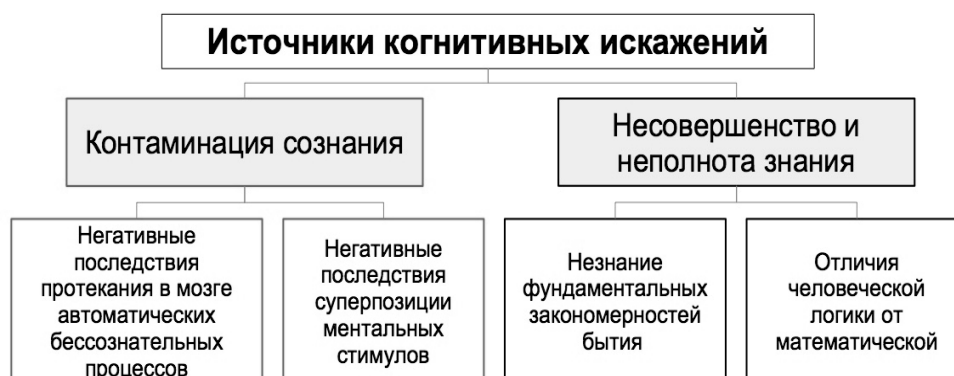


Рис. 1. Источники когнитивных искажений

Предлагаемая типизация, хотя и не претендует на всеобъемлющий характер, но тем не менее дает возможность определить основные задачи, решение которых позволит приблизиться к решению проблемы предупреждения и нейтрализации ментальной контаминации.

Негативные последствия протекания в мозге автоматических бессознательных процессов. В ходе эволюционного развития человечество выработало большое количество адаптивных моделей обработки информации. Многие из этих моделей основаны на автоматическом бессознательном принятии решений, что, несомненно, весьма эффективно, поскольку позволяет освободить наш корковый анализатор от решения рутинных задач, сохранив ресурс для обработки творческих и нестандартных ситуаций. Трудно представить, насколько изменилась бы жизнь, если бы людям пришлось отказаться от бессознательной обработки и автоматической классификации событий и объектов окружающего мира, пропуская все происходящее через узкий фильтр сознательного восприятия. Однако даже эти высокоэффективные модели имеют недостатки, свойственные большинству вычислительных систем: в некоторых случаях применение алгоритмической процедуры (удачной во всех

остальных отношениях) к особой совокупности входных данных может на выходе дать неприемлемый результат. Несмотря на это эффективность рассматриваемых нами эволюционных процедур бессознательной автоматической обработки информации высока настолько, что обусловленные ими преимущества заведомо превышают возможный ущерб от их применения [7]. Как отмечено в работе [8], «...рано или поздно будет доказано: многие недостатки людей тесно связаны с их наиболее сильными сторонами или вовсе являются прямым следствием и неизбежной платой за них».

Существующие модели защиты от нежелательных ментальных процессов существенно отличаются от сознательно освоенных правил поведения в определенных ситуациях. В настоящей части рассматриваем такие когнитивные модели, которые являются врожденными или настолько часто применяемыми, что не требуют постоянного участия сознания и могут считаться до определенной степени не контролируемыми. Многие из ментальных процессов, соответствующих таким моделям, удовлетворяют определению «автоматический». Признавая, что автоматическая обработка информации может принимать различные формы, тем не менее считаем, что имеет смысл вынести ее в отдельную категорию и рассматривать отдельно от сознательных процессов, происходящих в психике индивида.

Вместе с тем бессознательные автоматические процессы часто неявно сопутствуют более осознанному контролируемому ментальным процессам. Несколько моделей автоматической обработки информации в мозге человека, как будет показано позднее, подразумевают параллельное выполнение мозгом пары взаимодействующих процессов – сознательного контролируемого и автоматического бессознательного. Особый интерес представляет совокупность специфических ошибок, которые могут возникать в результате реализации такой модели обработки информации в мозге индивида. Данный класс ошибок можно рассматривать как неизбежный побочный результат выполнения полезных и эффективных в остальных отношениях ментальных процедур, сформировавшихся в ходе эволюции человека разумного. Таким образом, суждения, эмоции или поведение человека могут быть загрязнены неконтролируемыми бессознательными процессами. В некоторых случаях загрязнителями могут являться осознанные процессы, порожденные, в свою очередь, бессознательной активностью мозга.

Следует подчеркнуть, что мы ни в коем случае не утверждаем, что автоматическая обработка информации в мозге всегда приводит к загрязнению сознания. Однако убеждены, что данный тип психической активности периодически становится причиной нежелательных ментальных состояний.

В настоящей работе мы приводим несколько собственных примеров нежелательных последствий автоматической обработки информации, первый из которых относится к присутствующему человеку стремлению к категоризации своего физического и социального окружения.

Категоризация. Человеку свойственно соотносить объекты и явления, с которыми он сталкивается в реальной жизни, с существующей в его сознании структурой категорий, основанной на полученных ранее знаниях и опыте. «Отключить» данную систему категоризации практически невозможно. Несмотря на то, что существуют несколько спорных вопросов, требующих дальнейшего исследования, общепризнанным является тот факт, что быстрая категоризация окружения является частью человеческой природы [15–17].

Преимущества такой способности очевидны, однако изучению недостатков также посвящено большое число исследований, например [18, 19]. Одним из наиболее интересных нежелательных последствий категоризации является эффект возникновения стереотипов и предубеждений. Согласно результатам, подтвержденным многими исследователями, стереотипы в отношении социальных групп усваиваются в раннем детстве и автоматически вызываются из сознания при контакте с представителем данной социальной группы. При этом сознательно избавиться от влияния стереотипов на суждения о человеке, даже имея лучшие намерения, порой невозможно [14, 20, 21].

В соответствии с введенными в статье определениями, результат воздействия стереотипов на сознание индивида, не желающего иметь необоснованные предубеждения, является контаминацией. В исследованиях [9, 20] приводятся доказательства того, что часто индивид может противопоставить действию стереотипов сознательную коррекцию своего восприятия, однако сама попытка подавить нежелательные эмоции при активации стереотипа может увеличить частоту его проявления [14].

Вызов из памяти образов, наиболее часто подкрепляемых внешними стимулами. Доступность образов в памяти может быть определена как «степень готовности, с которой хранящийся в памяти образ извлекается и (или) используется при декодировании внешнего стимула» [22]. Экспериментальные исследования [10, 11, 23, 24] показали, что когда образ в памяти подкрепляется частым (или недавним) поступлением относящейся к нему информации, люди с большей вероятностью используют данный образ при формировании суждений. Доступность образов можно рассматривать как определяющий фактор категоризации. То есть люди склонны проецировать новый опыт в те знакомые им категории, которые наиболее часто извлекаются из памяти в повседневной жизни. Данный эффект происходит автоматически, без контроля со стороны сознания [23], что имеет свои негативные стороны. В частности, изучение эффекта предшествования (прайминга) показало, что образы в памяти и соответствующие им модели поведения могут быть иницированы информацией, не имеющей прямого отношения к текущей ситуации. При этом суждения людей подвергаются нежелательному воздействию и искажаются. Вместе с тем хотелось бы отметить, что результаты ряда проведенных исследований [25–28] позволяют поставить под сомнение эффективность если не большинства способов нижепорогового (сублиминального) воздействия на сознание и поведение человека, то по крайней мере – многих из них.

«Доверчивость» (субъективное оценивание истинности суждений). В психологии и философии в настоящее время главенствует выдвинутый Р. Декартом подход к пониманию процесса формирования суждений, который включает в себя два этапа. На первом этапе индивид формулирует предположение (например, «Иванов – трус»), а затем решает, стоит ли принять данное предположение как истинное (например, если оно согласуется с информацией, поступившей из других источников) или отвергнуть. Согласно данной парадигме, информация, не соответствующая действительности, не несет угрозы, поскольку человек может в любой момент отделить ложь от правды, отбросив те предположения, которые не выдержали проверку фактами. Однако в работах [21, 29] отстаивается иная точка зрения, восходящая, скорее, к взглядам Б. Спинозы. В соответствии с ней, первоначально индивид принимает в качестве истинного всякое предположение и лишь потом решает, стоит ли считать его ложным или нет. Таким образом, в примере, приведенном выше, индивид принимает на веру сообщение «Иванов – трус» сразу же, меняя (возможно) свое мнение только впоследствии под действием фактов.

Возможно представить множество ситуаций, при которых модели Р. Декарта и Б. Спинозы в конечном счете приводят к одинаковому результату (например, к суждению, что Петров сильный, поскольку нет фактов, свидетельствующих об обратном). Однако поскольку модель Спинозы подразумевает необходимость приложить некоторые ментальные усилия, на практике часто две модели дают существенно различные результаты. Если человек устал или напряженно работает, он может вообще не осуществить переход от первого этапа формирования суждений ко второму. В этом случае в декартовой модели индивид окажется в состоянии «зависшего» суждения (например, «Петров – сильный? Я приму окончательное решение позже, когда у меня будет время проверить факты»). В случае, если события станут разворачиваться по модели Спинозы, индивид останется в начальном состоянии, приняв на веру исходное предположение («Петров – сильный»). В работе Д. Гильберта приводятся описания и результаты экспериментов, подтверждающих справедливость модели Спинозы. Краткий результат этих экспериментов можно свести к следующему: когда когнитивные возможности

человека ограничены (например, напряженной работой), он испытывает существенные трудности с опровержением ложных информационных посылок.

«В основе способности перцептивных систем человека своевременно реагировать на изменения в окружающей обстановке лежит инстинктивное предположение о том, что большинство ощущений являются истинными. Вполне возможно, что и эффективность когнитивных систем достигается за счет принятия на веру того факта, что большинство предположений справедливы» [21]. Такое априорное убеждение об истинности суждений бесспорно подходит под определение ментальной контаминации первого типа (некорректная автоматическая обработка информации в сознании и подсознании).

Подавление мыслей и иронические процессы. Еще одной, весьма интересной, формой проявления феномена автоматической обработки информации являются так называемые «иронические процессы» [13, 14]. Иронический процесс запускается в том случае, если человек пытается сознательно подавить нежелательные или неприятные мысли (например, воспоминания о несчастной любви или ссоре с коллегой по работе). В соответствии с моделью Д. Вегнера, успешное подавление нежелательных мыслей зависит от результата взаимодействия двух процессов в мозге, один из которых протекает в подсознании, а второй – является относительно сознательным и контролируемым. Первый процесс, называемый также ироническим монитором, можно считать автоматическим. Его основной целью является поиск нежелательных ментальных объектов (мыслей), которые могут проникнуть в область сознательного. Как только такой объект обнаружен, запускается второй контролируемый процесс, называемый также процессом намерений. Его задача – сознательно заставить человека думать о чем-нибудь другом путем принудительного переключения фокуса внимания на другой ментальный объект. Два этих процесса работают в неразрывном тандеме с обратной связью. Процесс запускается снова, как только иронический монитор обнаруживает дальнейшие признаки возникновения нежелательных мыслей.

Д. Вегнер [13, 14] отметил, что при нормальных условиях данная система действует весьма успешно. По крайней мере, в краткосрочном периоде люди способны уменьшать количество нежелательных мыслей, проникающих в их сознание. Вместе с тем в долгосрочной перспективе это может вызвать различные побочные эффекты, в частности породить «иронический процесс», в результате которого попытка подавления нежелательных мыслей приводит к увеличению их проникновения в сознание. Иногда способность сознательно блокировать нежелательные мысли и эмоции, чтобы сосредоточиться на решении насущной задачи, оказывается исключительно важной.

Как и в случае с остальными примерами нежелательных результатов автоматической обработки информации, существуют определенные условия, при которых процедура подавления мыслей дает сбой с плохо предсказуемыми последствиями. Успешность ее выполнения зависит от тонкого баланса между бессознательными и контролируемыми процессами, осуществляющимися в мозге. Если человек становится неспособным сознательно обнаруживать отвлекающий фактор и контролировать его, запускается «иронический процесс»: бессознательный монитор продолжает вести поиск нежелательных мыслей, которые затем вторгаются в сознание, не будучи заблокированными сознательной контролируемой частью процедуры подавления. Как следствие, возникает состояние гипердоступности, при котором частота поступления нежелательных мыслей в сознание становится больше, чем она была бы, если бы человек не пытался их блокировать [13, 14]. Такая гипердоступность может в итоге привести к ситуации, которую большинство людей сочтут нежелательной, что соответствует введенному нами определению контаминации. Д. Вегнер, В. Эрбер и М. Боуман [30], в частности, провели эксперимент, во время которого людям, занятым различного рода умственной деятельностью (препятствующей успешному выполнению сознательной части процедуры подавления нежелательных мыслей), предлагалось «не допускать половой дискриминации» при ответах на вопросы теста, что парадоксально приводило к резкому увеличению числа дискриминирующих результатов.

Таким образом, ментальная контаминация может произойти тогда, когда полезные во всех остальных случаях адаптивные алгоритмы автоматической обработки информации в мозге человека начинают работать неправильно или лишаются контроля со стороны сознания. В работе рассматриваем подобные ошибки как побочные последствия эволюционных механизмов, обеспечивших выживание нашего биологического вида. Аналогии могут быть обнаружены не только в области психологии, но и в области физиологии. Так, например, тысячелетняя борьба с малярией внесла определенные коррективы в геном человека. Свыше трети африканцев, обитающих южнее Сахары, обладают мутацией – специфической деформацией эритроцитов, которая снижает риск заболеть малярией, но одновременно вызывает предрасположенность к серповидно-клеточной анемии. Необходимо рассмотреть и альтернативный подход к анализируемой проблеме нежелательных последствий автоматической обработки информации. Можно предположить, что правила, лежащие в основе автоматических процессов обработки информации, несовершенны сами по себе и могут быть исправлены таким образом, что не будут приводить к ошибочным результатам. Такая точка зрения базируется на следующем соображении: в настоящее время можем рассмотреть эволюцию процесса формирования суждений только в пределах чрезвычайно узкого периода времени. Но если было бы возможно провести ретроспективный анализ данного феномена на протяжении тысяч и даже миллионов лет, может быть, нам удалось бы разработать гораздо более совершенные процедуры обработки информации, лишенные многих рассмотренных выше недостатков [12, 31]. Несмотря на то, что изложенный альтернативный подход является, бесспорно, весьма интересным и достойным обсуждения, его практическая реализация в настоящее время, очевидно, не представляется возможной.

Еще раз хотим подчеркнуть, что всего лишь обращаем внимание на существование особого класса побочных эффектов от происходящих в сознании автоматических (и полезных во всех остальных отношениях) ментальных процессов. Ошибки, возникающие в результате выполнения этих автоматических процессов, имеют как минимум два важных отличия от ментальных ошибок первого класса (незнание алгоритмов обработки информации в мозге или неумение влиять на них):

1) они порождаются процессами обработки информации, происходящими большей частью за пределами нашего осознанного восприятия и контроля и, таким образом, трудно поддаются коррективке [23];

2) даже в случае, если бы индивид мог контролировать данные процессы и управлять ими, не вполне ясно, стал бы он сознательно поступать подобным образом, принимая во внимание адаптивный характер, высокую эффективность и общую полезность этих автоматических процессов (за исключением весьма редких случаев).

Суперпозиция стимулов. Контаминация сознания может также являться следствием суперпозиции, когда смешиваются два или более источника ментальных стимулов: память, мысли, ощущения, суждения. Используем термин «суперпозиция стимулов» в смысле, очень близком к термину «мониторинг источников», введенному в работе [32]. В обоих случаях предметом исследования является способность людей делать корректные выводы о причинах, породивших их поведенческие реакции или определенные мыслительные процессы. В повседневной жизни реакции людей практически всегда определяются множеством совокупно действующих стимулов. Кроме того, проведенные исследования позволяют утверждать, что люди крайне редко способны корректно подвергнуть критическому анализу свои реакции и определить точный вклад каждого из факторов в итоговое суждение. Обычно индивид может только осознать саму мысль или ощущение, но не причины, их породившие [33, 34]. «Невозможно сказать с уверенностью, что, например, 32% процента любви к супруге основаны на ее доброте, 11% – на ее чувстве юмора, 23% – на физической привлекательности, а остальное приходится на действие феромонов» [35]. По причине невозможности распознать точный вклад всех факторов в суждение индивида весьма непросто предпринять соответствующие меры для предотвращения нежелательного воздействия ментальных агентов, что в

конечном итоге часто приводит к контаминации. В табл. 2 приведены несколько известных примеров смешения ментальных стимулов.

Таблица 2

Нежелательные последствия суперпозиции ментальных стимулов

№	Пример
1	Ошибка атрибуции при определении источника эмоционального/психофизиологического возбуждения [36, 37]
2	Эффекты имплицитной памяти [38]
3	«Привязанность к просмотренному» – улучшение отношения объекта по мере увеличения числа контактов с ним [39]
4	«Гало-эффект» – восприятие человека или явления через призму предварительной информации о нем [40]
5	Влияние настроения на суждения [41]
6	Эффект ложного консенсуса (склонность проецировать свой способ мышления на других людей)
7	«Эффект заголовка» – неосознанное предвзятое отношение к субъекту сообщения СМИ на основании его заголовка
8	Эффект воздействия внешних шумов на интерес к событию [42]
9	Эффект влияния намека на выбор случайного числа испытуемыми [43]
10	Присвоение чужих идей [44]
11	«Проклятие знания» – невозможность исключить из суждения полученную конфиденциальную информацию [45]
12	«Эффект спящего» – изменение мнения спустя некоторое время под влиянием полученной информации [46]
13	Эффект наводящего вопроса [47]

Первый из перечисленных примеров относится к классическим эффектам ошибки атрибуции, когда люди путают, какая из двух (или большего количества) причин стала источником их нервного возбуждения. В частности, в одном из экспериментов испытуемые ошибочно считали, что их возбуждение вызвано оскорбительными вопросами анкеты, а не действием медицинского препарата (как было на самом деле) [36]. В другом случае, наоборот, полагали, что наблюдаемый эффект обусловлен принятой ими в ходе эксперимента таблеткой (в действительности – плацебо), а не полученным болезненным электрическим разрядом [48]. В третьем эксперименте физиологические проявления возбуждения (учащенное дыхание и сердцебиение, тремор) приписывались физической привлекательности лаборантки, проводившей испытание [49], а не страху, испытанному при переходе опасного моста. И наконец, в исследовании [37] в качестве причины ошибочно назывался просмотренный фрагмент видеофильма эротического содержания, а не выполненные физические упражнения. Хотя всеобщий характер эффекта ошибочной атрибуции подвергался сомнению некоторыми учеными [50–52], само явление смешения источников и ложного определения главной причины возбуждения имеет достоверный и неопровержимый характер [53].

Исследования, посвященные неосознаваемому воздействию памяти на сознательную активность, позволили назвать еще один источник контаминации. Например, в исследовании [38] испытуемым предлагалось прочесть список имен и фамилий случайных незначительных людей (таких, например, как Себастьян Вейсдорф). Позже тем же испытуемым давали список имен и фамилий, в котором встречались некоторые лица из первого списка, и просили отметить среди них тех, кого испытуемые считали людьми знаменитыми. Если испытуемые точно помнили, что имя из второго списка уже попадалось им в первом списке, то они с легкостью идентифицировали данного человека как «не знаменитого», поскольку точно знали,

что первый список включал в себя только не выдающихся ничем лиц. Однако если они не помнили, что видели имя в первом списке, то бессознательный процесс в памяти мог заставить испытуемых принять неверное решение и отметить человека как знаменитость, поскольку имя могло казаться смутно знакомым. Иными словами, наблюдался эффект суперпозиции стимулов, в результате которого испытуемые ошибочно полагали, что узнавание имени вызвано известностью человека, а не предыдущей демонстрацией этого имени в эксперименте.

В табл. 2 также приведены несколько других примеров суперпозиции стимулов. Среди них присутствует и гало-эффект, который использовался в самом начале, чтобы привести пример предвзятого отношения преподавателя к студенту. Указанные примеры отвечают введенному определению контаминации сознания в том смысле, что ментальные процессы становятся причиной суждений, эмоций и других реакций, которые люди, по крайней мере в отдельных случаях, сочли бы нежелательными. Следует отметить, что данный вид контаминации обладает некоторыми признаками ранее рассмотренного типа (нежелательные последствия автоматической обработки информации). В основном оба типа контаминации становятся возможными по одним и тем же причинам: ограниченность контроля собственного сознания и подсознание. Некоторые примеры контаминации сознания, такие, например, как эффекты доступности знаний в памяти, сложно однозначно классифицировать. Ранее рассмотрен данный эффект в качестве примера нежелательных последствий автоматической обработки информации в мозге, поскольку поведенческая модель в сознании активируется предварительно поступившей информацией (эффект прайминга), и позднее данная модель оказывает влияние на суждение. Однако тот же процесс можно отнести и ко второму типу контаминации – смешению источников, при котором индивид не может определить степень влияния на его суждения относительно некоторого объекта (например, другого человека) источника 1 (объективные свойства и качества) и источника 2 (активированная в результате действия эффекта прайминга модель взаимодействия с данной социальной категорией людей). На самом деле, любой пример смешения источников может быть рассмотрен в качестве проявления нежелательного последствия автоматической обработки информации, если допустить, что невозможность разобраться в сложной суперпозиции ментальных стимулов является побочным продуктом применяемой видом *Homo sapiens* модели генерации суждений и оценок вне области сознательного.

Несмотря на некоторое пересечение, все же полагаем, что существует как минимум три причины, по которым два данных типа контаминации следует рассматривать отдельно.

Во-первых, в приведенных примерах смешения источников труднее определить функциональный процесс в сознании, который вызывает эффект контаминации, в отличие от примеров, рассмотренных ранее (нежелательные последствия автоматической категоризации). Например, выгоды от процессов, приводящих к ошибкам атрибуции или «гало-эффекту» во все не очевидны. И если бы кому-нибудь пришло в голову создать модель идеального сознания, вряд ли он включил бы в нее процессы, приводящие к таким ошибкам. Напротив, процессы автоматического доступа (к часто используемой информации), скорее всего, попали бы в такую «идеальную» модель, поскольку обеспечивают человеку возможность иметь «под рукой», так сказать в «быстром кэше» сознания, рабочую картину мира [59].

Во-вторых, в отличие от ошибок, происходящих в результате автоматической обработки, смешение источников включает в себя ошибки атрибуции, при которых индивид делает неверные выводы о причинах своих ответных реакций.

В-третьих, стратегии, которые позволяют избежать нежелательных последствий при контаминации второго типа (смешение источников), существенно отличаются, как будет показано ниже.

Также хотелось бы подчеркнуть, что, хотя «чистые» примеры ошибок каждого типа встречаются в повседневной жизни гораздо чаще, всякая ошибка является следствием сложного взаимодействия нескольких причин. Представим человека, вложившего все свои сбере-

жения в инвестиционный фонд, который затем в течение целого года показывает отрицательные значения прибыли. Вполне может оказаться, что неудачное решение о вложении денег в данный конкретный фонд стало результатом действия ошибок всех рассмотренных типов.

Во-первых, на решение могло повлиять незнание (или игнорирование) статистического закона возврата случайной величины к среднему значению. То есть тот факт, что фонд показал высокие значения прибыли в прошлом году, мог заставить человека сделать ошибочный вывод, что такая тенденция должна сохраниться и в следующем году.

Во-вторых, могли иметь место нежелательные последствия автоматической обработки информации. Так, например, физическая усталость могла привести к тому, что откровенно завышенные обещания, озвученные сотрудниками фонда, проникли в сознание, минуя критическое восприятие (не вызвали «отторжения» – в терминах работы Гилберта [12]).

В-третьих, память индивида могла хранить такое большое количество успешных примеров вложения сбережений в инвестиционные фонды (даже если эти «воспоминания» были навязаны рекламой других фондов), что вообразить иной сценарий развития событий было невозможно.

Даже принимая во внимание тот факт, что ошибочное суждение может быть следствием сложного взаимодействия различных факторов и процессов в сознании и подсознании, считаем, что предложенная классификация имеет теоретическую и практическую ценность для определения общих подходов к устранению последствий ментальной контаминации. Как показано в работах Р. Нисбетта и его коллег [8, 33, 48], вполне возможно обучить людей действовать в некоторых житейских ситуациях, руководствуясь универсальными законами логики и математики, повысив таким образом эффективность принимаемых ими решений. Например, объяснив суть статистического закона колебания значений случайной величины в окрестности математического ожидания, можно заставить человека задуматься, стоит ли вкладывать свои сбережения в фонд, руководствуясь только его высокими показателями в прошлом году. Но знание правил математики и логики вряд ли уберет человека от контаминации сознания, обусловленной склонностью к исходному принятию утверждений в качестве истины (модель Спинозы) или нежелательным воздействием рекламы.

Далее изложим наши взгляды на то, каким образом возможно избежать контаминации сознания или, допустив ее, нейтрализовать последствия такой контаминации.

Предотвращение контаминации сознания. В общем случае полностью избежать контаминации сознания невозможно, поскольку она является следствием таких фундаментальных свойств психики человека, как невозможность постоянного самоконтроля над мышлением и отсутствие достоверных знаний о сущности процессов, происходящих в сознании.

Контаминация происходит в том случае, когда индивид не подозревает о протекании нежелательного процесса, не имеет соответствующей мотивации для его коррекции, не обладает сведениями о направлении и величине отклонения от нормы или не способен сознательно корректировать данное отклонение.

На рис. 2 представлена общая схема, следование которой позволит избежать ментальной контаминации или нейтрализовать ее негативные последствия. Необходимыми условиями являются информированность о возможности нежелательного воздействия на сознание и подсознание, мотивация для устранения нежелательного эффекта, наличие сведений о



Рис. 2. Условия контаминации сознания

направленности и величине отклонения психических процессов от нормы и возможность контролировать собственные поведенческие реакции на уровне, адекватном протекающему негативному процессу.

Результаты проведенных исследований показывают, что нежелательное воздействие может быть частично или полностью нейтрализовано самим индивидом посредством рефлексии и выдвижения контраргументов навязываемой идее [55]. Следует, однако, отметить, что такой способ в ряде случаев неэффективен. В частности, это происходит, когда субъект суггестии находится в состоянии повышенного возбуждения и рассеянного внимания [56], не имеет достаточно времени для подготовки контраргументов перед предъявлением ему побудительного стимула [55] или не может выдвинуть контраргументы, в частности по причине их очевидной несостоятельности [57]. Так, например, когда испытуемым предлагалось назвать первое пришедшее в голову «однозначное число» [43], частота ответов, содержащих цифру «один», возрастала. Однако если задача ставилась таким образом, что подсказка становилась очевидной, испытуемые неосознанно противились навязываемому им решению и выбирали другой ответ. Когда участников эксперимента просили назвать «любое число от 0 до 9, например, число один» [43], частота ответа «один» не возрастала. Тем не менее, когда возможность контролировать собственную ответную реакцию ограничена, например в состоянии аффекта, способность людей противостоять ментальной контаминации, даже если они прилагают соответствующие усилия [58], существенно снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, рассмотренные и обобщенные в настоящей статье, позволяют обоснованно утверждать, что существуют два класса когнитивных искажений. Выделение первого класса обусловлено неумением следовать правилам логики или незнанием таких правил. Ко второму классу относятся ошибки, вызванные контаминацией сознания. Следствием контаминации становятся неосознаваемые или неконтролируемые ментальные процессы, в результате которых индивид испытывает нежелательные эмоции, выносит некорректные суждения или демонстрирует ошибочное поведение.

С большой долей оптимизма можно утверждать, что, обучив человека основным правилам логики, необходимым в повседневной жизни, части ментальных ошибок первого класса возможно избежать. При этом прогноз возможности избежать ментальных ошибок второго класса скорее пессимистичен. Причины кроются глубоко в природе человеческого сознания (невозможность полного контроля над психическими процессами) и в убеждениях людей относительно законов его функционирования (например, вера людей в то, что свои собственные мысли и поступки они могут контролировать лучше, чем другие представители общества; недостаточное развитие теории контаминации сознания и т. д.).

Немаловажной особенностью является тот факт, что убеждения людей относительно возможной контаминации сознания сильно зависят от их культурной принадлежности. Так, например, в июле 1964 года во время антиправительственного восстания племен в Конго местные шаманы убедили повстанцев, что, вступив в бой, каждый из бойцов превратится в «Симба» (суахили – лев) – воина, наделенного сверхспособностями, в частности неуязвимостью к вражеским пулям. Для приобретения неуязвимости достаточно было повторять заклинание «май!-май!» (вода!-вода!), вследствие чего пули противника должны были превращаться в воду.

Представители различных культур могут иметь существенно отличающиеся взгляды на вероятные источники ментальной контаминации и, соответственно, применять непохожие друг на друга приемы и способы противодействия ей. Соответствие между нежелательными психическими процессами, возникшими под воздействием ментальной контаминации, и

культурно-этнической спецификой представлений о возможности негативного влияния на сознание является актуальной темой дальнейших исследований.

Список используемых источников

1. *Wason P.* Reasoning // New Horizons Psychol. – Hammondsouth UK Penguin Books, 1966.
2. *Oakhill J., Johnson-Laird P.N., Garnham A.* Believability and syllogistic reasoning // *Cognition*. – 1989. – Vol. 31. – P. 117–140.
3. *Kahneman D., Tversky A.* Subjective Probability: A Judgement of Representativeness // *Cogn. Psychol.* – 1972. – Vol. 3. – P. 430–454.
4. *Cohen L.J.* Can human irrationality be experimentally demonstrated? // *Behav. Brain Sci.* – 2010. – Vol. 4. – P. 317.
5. *Kahneman D., Tversky A.* On the psychology of prediction // *Psychol. Rev.* – 1973. – Vol. 80. – P. 237–251.
6. *Fischhoff B., Slovic P., Lichtenstein S.* Knowing with certainty: The appropriateness of extreme confidence // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* – 1977. – Vol. 3. – P. 552–564.
7. *Einhorn H.J., Hogarth R.M.* Behavioral decision theory: Processes of judgement and choice // *Annu. Rev. Psychol. Annual Reviews* 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA. – 1981. – Vol. 32, – № 1. – P. 53–88.
8. *Nisbett R.E., Ross L.* Human inference: Strategies and shortcomings of social judgment // *Soc. Judgm.* – 1980. – P. 334.
9. *Devine P.G.* Automatic and controlled processes in prejudice: The role of stereotypes and personal beliefs. – Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1989.
10. *Higgins E.T.* Knowledge accessibility and activation: Subjectivity and suffering from unconscious sources // *Unintended thought*. – 1989. – P. 3–51.
11. *Wyer Jr R.S., Srull T.K.* Memory and cognition in its social context. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. – 1989.
12. *Gilbert D.T.* How mental systems believe // *Am. Psychol. American Psychological Association*. – 1991. – Vol. 46, – № 2. – P. 107.
13. *Wegner D.M.* You can't always think what you want: Problems in the suppression of unwanted thoughts // *Adv. Exp. Soc. Psychol.* – 1992. – Vol. 25. – P. 193–225.
14. *Wegner D.M.* Ironic processes of mental control. // *Psychol. Rev. American Psychological Association*. – 1994. – Vol. 101, – № 1. – P. 34.
15. *Medin D.L.* Concepts and conceptual structure // *Am. Psychol. American Psychological Association*. – 1989. – Vol. 44, – № 12. – P. 1469.
16. *Rosch E.* Principles of categorization // *Concepts core readings*. – MIT Press, 1999. – P. 189–206.
17. *Smith E.E., Medin D.L.* Categories and concepts. – Harvard University Press, 1981.
18. *Brewer M.B.* A dual process model of impression formation. – Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 1988.
19. *Fiske S.T., Lin M., Neuberg S.L.* The continuum model // *Dual-process Theor. Soc. Psychol.* – 1999. – P. 254–321.
20. *Devine P.G.* Stereotypes and prejudice: their automatic and controlled components // *J. Pers. Soc. Psychol. American Psychological Association*. – 1989. – Vol. 56, – № 1. – P. 5.
21. *Gilbert D.T., Hixon J.G.* The trouble of thinking: activation and application of stereotypic beliefs. // *J. Pers. Soc. Psychol. American Psychological Association*. – 1991. – Vol. 60, – № 4. – P. 509.

22. Higgins E.T., King G. Accessibility of social constructs: Information processing consequences of individual and contextual variability // *Personal. Cogn. Soc. Interact.* – 1981. – Vol. 69. – P. 121.
23. Bargh J.A. Conditional automaticity: Varieties of automatic influence in social perception and cognition // *Unintended thought.* – 1989. – Vol. 3. – P. 51–69.
24. Uleman J.S., Bargh J.A. *Unintended thought.* – Guilford Press, 1989.
25. Merikle P.M. Subliminal auditory messages: An evaluation // *Psychol. Mark. Wiley Online Library.* – 1988. – Vol. 5, – № 4. – P. 355–372.
26. Moore T.E. Subliminal advertising: What you see is what you get // *J. Mark. JSTOR.* – 1982. – P. 38–47.
27. Pratkanis A.R., Greenwald A.G. Recent perspectives on unconscious processing: Still no marketing applications // *Psychol. Mark. Wiley Online Library.* – 1988. – Vol. 5, № 4. – P. 337–353.
28. Zanot E.J., Pincus J.D., Lamp E.J. Public Perceptions of Subliminal Advertising // *J. Advert.* – 1983. – Vol. 12. – P. 39–45.
29. Gilbert D.T. *The assent of man: Mental representation and the control of belief.* – Prentice-Hall, Inc. – 1993.
30. On trying not to be sexist / D.M. Wegner et al. // *Unpubl. Manuscr.* – 1993.
31. Stich S.P. *The fragmentation of reason: Preface to a pragmatic theory of cognitive evaluation.* – The MIT Press, 1990.
32. Johnson M.K., Hashtroudi S., Lindsay D.S. Source monitoring. // *Psychol. Bull. American Psychological Association.* – 1993. – Vol. 114, № 1. – P. 3.
33. Nisbett R.E., Wilson T.D. Telling more than we can know: Verbal reports on mental processes // *Psychol. Rev. American Psychological Association.* – 1977. – Vol. 84, № 3. – P. 231.
34. Wilson T.D. et al. *Introspection, attitude change, and attitude-behavior consistency: The disruptive effects of explaining why we feel the way we do.* – Academic Press, 1989.
35. Wilson T.D., Hodges S.D. Attitudes as temporary constructions // *Constr. Soc. judgments.* – 1992. – Vol. 10. – P. 37–65.
36. Schachter S., Singer J. Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. // *Psychol. Rev. American Psychological Association.* – 1962. – Vol. 69, № 5. – P. 379.
37. Zillmann D. Attribution and misattribution of exctatory reactions // *New Dir. Attrib. Res.* / ed. J.H. Harvey, W. Ickes, R.F. Kidd, N.J. Hillsdale. – 1978. – Vol. 2. – P. 335–368.
38. Jacoby L.L., Woloshyn V., Kelley C. Becoming famous without being recognized: Unconscious influences of memory produced by dividing attention. // *J. Exp. Psychol. Gen. American Psychological Association.* – 1989. – Vol. 118, № 2. – P. 115.
39. Bornstein R.F., D'Agostino P.R. The attribution and discounting of perceptual fluency: Preliminary tests of a perceptual fluency/attributional model of the mere exposure effect // *Soc. Cogn. Guilford Press.* – 1994. – Vol. 12, № 2. – P. 103–128.
40. Nisbett R.E., Wilson T.D. The halo effect: Evidence for unconscious alteration of judgements // *J. Personal. Soc. Physiol.* – 1977. – № 35. – P. 250–256.
41. Schwarz N., Clore G.L. Mood, misattribution, and judgements of well-being: Informative and directive functions of affective states // *J. Personal. Soc. Physiol.* – 1983. – № 45. – P. 513–523.
42. Damrad-Frye R., Laird J.D. The experience of boredom: The role of the self-perception of attention. // *J. Pers. Soc. Psychol. American Psychological Association.* – 1989. – Vol. 57, № 2. – P. 315.
43. Kubovy M. Response availability and the apparent spontaneity of numerical choices. // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. American Psychological Association.* – 1977. – Vol. 3, № 2. – P. 359–364.

44. Wicklund R.A., Reuter T., Schiffmann R. Acting on ideas: Appropriation to one's self // Basic Appl. Soc. Psych. Taylor & Francis. – 1988. – Vol. 9, № 1. – P. 13–31.
45. Keysar B., Ginzler L.E., Bazerman M.H. States of affairs and states of mind: The effect of knowledge of beliefs // Organ. Behav. Hum. Decis. Process. Elsevier. – 1995. – Vol. 64, № 3. – P. 283–293.
46. In search of reliable persuasion effects: III. The sleeper effect is dead: Long live the sleeper effect / A.R. Pratkanis et al. // J. Pers. Soc. Psychol. American Psychological Association. – 1988. – Vol. 54, № 2. – P. 203.
47. Penrod S.D., Loftus E.F., Winkler J. The reliability of eyewitness testimony: A psychological perspective // Psychol. Court. Academic Press San Diego. – 1982. – P. 119–168.
48. Nisbett R.E., Schachter S. Cognitive manipulation of pain // J. Exp. Soc. Psychol. Elsevier. – 1966. – Vol. 2, – № 3. – P. 227–236.
49. Dutton D.G., Aron A.P. Some evidence for heightened sexual attraction under conditions of high anxiety. // J. Pers. Soc. Psychol. American Psychological Association. – 1974. – Vol. 30, – № 4. – P. 510.
50. Marshall G.D., Zimbardo P.G. Affective consequences of inadequately explained physiological arousal. American Psychological Association. – 1979.
51. Maslach C. Negative emotional biasing of unexplained arousal. American Psychological Association. – 1979.
52. Reisenzein R. The Schachter theory of emotion: two decades later // Psychol. Bull. American Psychological Association. – 1983. – Vol. 94, № 2. – P. 239.
53. Olson J.M., Zanna M.P. Self-inference processes. – Psychology Press, 1990. – Vol. 6.
54. Higgins E.T., Bargh J.A. Unconscious sources of subjectivity and suffering: Is consciousness the solution // Constr. Soc. judgments. Lawrence Erlbaum Associates Hillsdale, NJ. – 1992. – P. 67–103.
55. Petty R.E., Cacioppo J.T. Communication and persuasion: Central and peripheral routes to attitude change. – Springer-Verlag New York, 1986.
56. Forewarning of content and involvement: Consequences for persuasion and resistance to persuasion / H.C. Chen et al. // J. Exp. Soc. Psychol. Elsevier. – 1992. – Vol. 28, № 6. – P. 523–541.
57. McGuire W.J., Papageorgis D. Effectiveness of forewarning in developing resistance to persuasion // Public Opin. Q. AAPOR. – 1962. – Vol. 26, № 1. – P. 24–34.
58. Wetzel C.G., Wilson T.D., Kort J. The halo effect revisited: Forewarned is not forearmed // J. Exp. Soc. Psychol. Elsevier. – 1981. – Vol. 17, № 4. – P. 427–439.

В.В. Данилов;
В.И. Якунин,
кандидат техн. наук

АППРОКСИМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ЗАРАЖЕННЫХ ОПРЕДЕЛЕННЫМ ВРЕДОНОСНЫМ ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ХОСТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНТЕНСИВНОСТИ DNS – ЗАПРОСОВ ОТ НИХ

В данной работе построена модель поступления DNS-запросов на DNS-сервер с целью разработки алгоритма оценивания значений параметров распределения интервалов времени поступления DNS-запросов, а именно их интенсивности. Полученные значения интенсивности позволяют более полно описывать профили сетевых объектов, использующих сервисы доменных имен, для определения состояний реальных объектов. Использование данного параметра может расширить возможности средств выявления определенного вредоносного программного обеспечения.

Ключевые слова: DNS-сервер, DNS-запрос, домен, интенсивность поступления, профилирование сетевых объектов, гиперэкспоненциальное распределение, аппроксимация, кэш, кэширование записей.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сервисы доменных имен (СДИ) занимают особое положение среди технологий глобальной компьютерной сети (ГКС) Интернет, так как работа пользователей конечных узлов с другими сетевыми сервисами в большинстве сценариев невозможна без СДИ, а в лучшем случае – сильно затруднена. Важнейшим составным элементом СДИ, обеспечивающим доступ к ресурсам ГКС помимо DNS-серверов, является протокол Domain Name System (DNS). Поэтому в качестве объекта исследований при изучении вредоносной активности злоумышленников в ГКС Интернет выбраны СДИ.

Проведенный анализ регламентирующих документов [1, 2] показывает, что структура СДИ состоит из следующих элементов:

- DNS-клиентов, которые отправляют запросы DNS-серверу на преобразование доменного имени в IP-адрес;
- протокола DNS, который служит для реализаций двух основных функций:
 - а) позволяет клиентским компьютерам запрашивать DNS-сервер об IP-адресе или имени какого-либо хоста в сети;
 - б) позволяет производить обмен информацией между базами данных DNS-серверов;
- DNS-серверов, которые позволяют избежать проблем, связанных с хранением информации большого объема в одном месте (пространство DNS-имен разделено на непересекающиеся зоны). Каждая зона также ассоциируется с одним или несколькими серверами;
- информационного ресурса (DNS-ресурс).

Мониторинг основных аспектов функционирования СДИ существующими средствами позволяет установить особенности субъектно-объектного сетевого взаимодействия. Но в то же время при выполнении задачи расследования компьютерного инцидента – выявления зараженных вредоносным программным обеспечением (ВПО) хостов, использующих СДИ, не учитывается взаимосвязь между периодами обновления доменных записей в кэше DNS-сервера и интервалами времени поступления DNS-запросов в качестве признака заражения хоста. В связи с этим возникла актуальная задача определения интенсивности поступления DNS-запросов вредоносных информационных ресурсов на DNS-сервер на основе технологии кэширования доменных записей, решение которой и рассматривается в данной работе.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИМЕН В СЕРВИСАХ ДОМЕННЫХ ИМЕН

Процесс преобразования доменного имени в IP-адрес предполагает строго регламентированное взаимодействие DNS-клиента и цепочки DNS-серверов. Установление соединения с любым ресурсом осуществляется только по соответствующим IP-адресам. Поэтому DNS-клиенту необходимо преобразование доменного имени в числовое представление (требуется найти IP-адрес домена, где содержится искомое доменное имя). Для решения этой задачи СДИ использует DNS-серверы (N-DNS и R-DNS), которые подразделяются на нерекурсивные (итеративное преобразование имен) (рис. 1) и на рекурсивные (рекурсивное преобразование имен) серверы (рис. 2). Нерекурсивные серверы имеют большие вычислительные мощности для обработки значительного числа запросов, но не имеют возможности хранить в буфере памяти (в кэше) ответы на запросы, а перенаправляют их на другие DNS-серверы. Рекурсивные серверы в большинстве случаев являются локальными и имеют возможность кэшировать ответы, что при повторных одинаковых запросах уменьшает время процесса получения ответа.

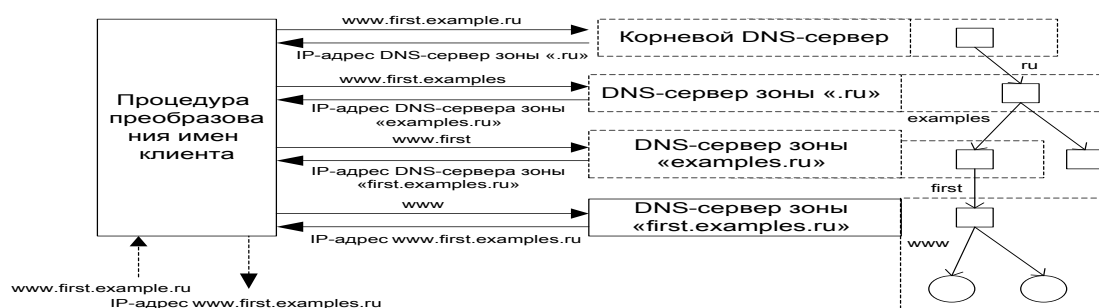


Рис. 1. Схема итеративного преобразования доменных имен

Кэширование – важная функция DNS-серверов. При последовательном обращении сервера к другим узлам в процессе выполнения рекурсивного запроса DNS-сервер может временно сохранять в кэш-памяти информацию, содержащуюся в получаемых им ответах. В таком случае повторный запрос доменного имени не отправляется к вышестоящим DNS-серверам, так как ответ хранится в кэше. Предельно допустимое время кэширования содержится в поле TTL ресурсной записи домена. Благодаря кэшированию [хранению записей «доменное имя – IP-адрес» (данных из ранее полученных ответов на запросы)] увеличивается скорость обработки последующих запросов.

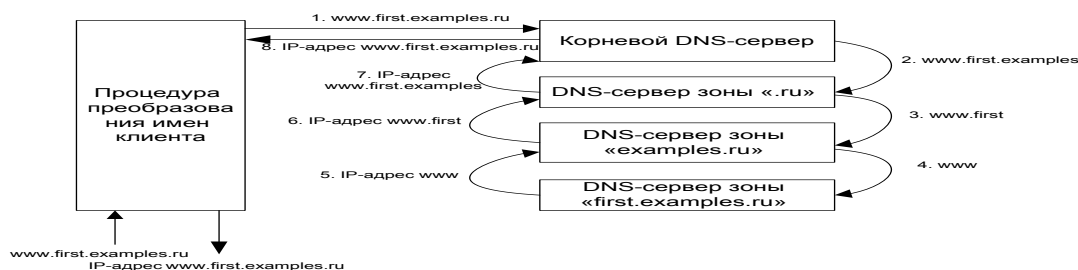


Рис. 2. Схема рекурсивного преобразования доменных имен

Каждый клиент имеет доступ к локальной процедуре преобразования имен, которая и реализует этот процесс.

Таким образом, R-DNS-сервера непосредственно взаимодействуют с приложениями на узлах конечных пользователей, а именно, DNS-запросы, наблюдаемые между узлами конечных пользователей и R-DNS-серверами, характеризуют специфику выполняемых

DNS-операций. Поэтому R-DNS-сервера могут рассматриваться как приоритетные объекты для мониторинга с целью обеспечения компьютерной безопасности. Обработка и соответствующий анализ выделенных параметров по результатам мониторинга R-DNS-сервера позволит профилировать сетевое взаимодействие между ним и DNS-клиентом. В связи с этим рассмотрим подход к профилированию сетевых объектов, использующих СДИ.

ПОДХОД К ПРОФИЛИРОВАНИЮ СЕТЕВЫХ ОБЪЕКТОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ СЕРВИСЫ ДОМЕННЫХ ИМЕН

Проведенный анализ [4, 5] показывает, что в настоящее время профилирование сетевых объектов проводится с использованием методов технической диагностики, главной задачей применения которых является распознавание состояний объектов в условиях ограниченной информации, а также методов теории идентификации, использование которых позволяет построить модель объекта по реализациям его входных и выходных параметров.

Обычно используется подход по определению технического состояния объекта, основанный на критериях соответствия значений показателей качества. Такие критерии задают области допустимых значений показателей качества. Диагностическими признаками при этом будут являться значения показателей качества объекта (параметры системы и характеристики процесса ее функционирования) или некоторые функции от них.

Для определения параметров, характеризующих сетевые объекты, использующие СДИ, применяются современные средства анализа сетевого трафика. Данные параметры после соответствующей обработки возможно разделить на две группы:

- специфичные параметры (IP-адреса, номера портов источника и назначения, используемые протоколы транспортного и прикладного уровней, тип сервиса и т. д.), которые полезны для решения задачи первичной обработки сетевых объектов, использующих СДИ, и выделения из общего потока анализируемого трафика;
- неспецифичные параметры, нехарактерные для штатного функционирования СДИ, качественные параметры, повышающие вероятность правильного распознавания состояния сетевого объекта, реализуемого при наличии других признаков

Таким образом, для решения задачи профилирования субъектно-объектного сетевого взаимодействия необходимо осуществить определение комплекса признаков и отнесение к ним соответствующих состояний.

Так как изменение специфичных параметров при осуществлении внешнего или внутреннего воздействий, реализуемых злоумышленником на ИТКС, в основном никак не проявляется, то предлагается провести фильтрацию по значениям полученных параметров и выявить те параметры (неспецифичные), по которым возможно определить признаки нештатного поведения сетевого объекта. Результаты фильтрации позволили выявить следующие параметры [6] – интервал времени между DNS-запросами и период обновления доменных записей в кэше DNS-сервера.

Поэтому для решения задачи профилирования был разработан подход, основанный на моделях, необходимых для определения состояний сетевых объектов, использующих СДИ:

- коммуникационного профиля (специфичные параметры)

$$Pr^{(K)} = \{D_{name}, X_{IP_D}, Q_W, Q_{type}, V_{in}, V_{out}, Pl_{tr}, \tau_D, T, Sr\}, \quad (1)$$

где D_{name} – запрашиваемое доменное имя;

X_{IP_D} – IP-адрес источника;

X_{IP_D} – IP-адрес назначения;

Q_W – вид DNS-запроса;

Q_{type} – тип DNS-запроса;

V_{in} – объем входных данных;

- V_{out} – объем выходных данных;
 Pt_{tr} – протокол транспортного уровня;
 τ_D – время пребывания доменного имени в кэше DNS-сервера (TTL);
 T – момент времени инициализации сетевого сервиса;
 Sr – тип сетевого сервиса;
 – поведенческого профиля (неспецифичные параметры)
- $$Pr^{(n)} = \varphi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m), \quad (2)$$

где ξ_m – измеренное значение i -го параметра [$i = 1, \dots, m$];

- m_1 – число повторяющихся пар байт сессии;
 m_2 – число пакетов одинаковой длины в каждом направлении;
 m_3 – длина первых 4 пакетов каждого направления;
 m_4 – длина интервала времени между DNS-запросами;
 m_5 – период обновления доменных имен в кэше DNS-сервера.

Для определения поведения сетевого объекта, использующего СДИ, проведен анализ параметров с использованием технологии активного сканирования R-DNS-серверов на основе механизма кэширования записей в кэше с учетом значения TTL, с целью установления соответствующих признаков.

На рис. 3 показана динамика кэширования ответа на запрос (пара: доменное имя – IP-адрес). В частности, если пользователь отправляет рекурсивный запрос на разрешение доменного имени к R-DNS-серверу и у него отсутствует соответствующая запись в кэше, то он будет отправлять запросы вышестоящим DNS-серверам (рис. 2, 3). В итоге R-DNS-сервер получит и переправит запрашивающему пользователю искомый ответ с IP-адресом домена и значением τ_D TTL. Полученный ответ R-DNS-сервер кэширует на TTL-единиц времени. Любой другой пользователь в той же сети может получить кэшированную запись с TTL, отправив соответствующий запрос R-DNS-серверу.

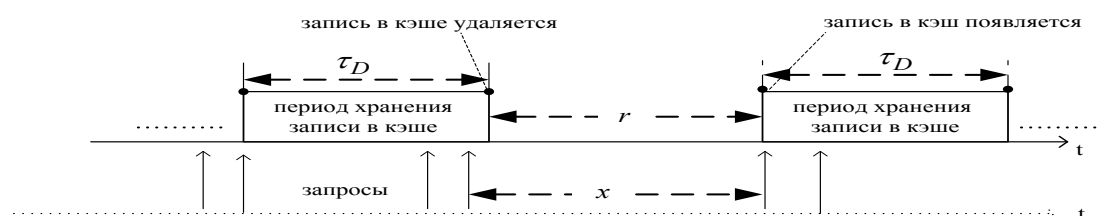


Рис. 3. Технология кэширования доменной записи конкретного домена

С одной стороны, обоснуем рассмотрение нерекурсивных DNS-запросов, которые используются для проверки кэша R-DNS-сервера. В соответствии с RFC 2136, когда R-DNS-сервер принимает нерекурсивный запрос, он осуществляет поиск ответа на запрос на основе своих записей в кэше, не обращаясь к внешним N-DNS-серверам. При любом сценарии нерекурсивный запрос только считывает запись кэша и никогда не изменяет его динамику.

С другой стороны, независимо от динамики обновления кэша датчики сканирования кэша будут периодически отправлять нерекурсивные DNS-запросы R-DNS-серверу с периодичностью τ_D , равной TTL доменной записи.

Исходя из сказанного выше будем полагать, что проверка кэша датчиками сканирования и DNS-запросы от конечных хостов взаимно независимы.

Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться нерекурсивные запросы для проверки кэша, так как с их помощью возможно получить следующую информацию:

- наличие или отсутствие записи доменного имени в кэше R-DNS-сервера;
- значение оставшегося интервала времени хранения записи в кэше.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим процесс передачи DNS-запросов от конечного узла к R-DNS-серверу. Данный процесс обуславливает специфику DNS-операций, которая характеризуется целым рядом параметров.

Дано:

- множество $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ пользователей, отправляющих DNS-запросы доменного имени D_{name} на R-DNS-сервер;
- запрашиваемое доменное имя D_{name} ;
- IP-адрес $X_{IP_ист}$ источника;
- IP-адрес $X_{IP_назн}$ назначения;
- значение длины интервала τ_D времени хранения записи в кэше (TTL);
- вид DNS-запроса Q_W ;
- тип DNS-запроса Q_{type} ;
- множество $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ моментов времени, в которые наблюдаются источники данных;
- протокол транспортного уровня – Pt_{tr} .

В процессе реализации DNS-операций при решении задачи профилирования сетевых объектов, использующих СДИ, примем следующие ограничения:

- не рассматриваются доменные имена с TTL $\tau_D = 0$;
- не рассматриваются доменные имена, которые не имеют IP-адреса.

Пусть совокупность пользователей $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ отправляет запросы доменного имени D_{name} к R-DNS-серверу. Если запись доменного имени D_{name} отсутствует в кэше R-DNS-серверы, то первый рекурсивный DNS-запрос приведет к тому, что его запись в кэше будет храниться на сервере в течение интервала τ_D времени. Если запись доменного имени D_{name} имеется в кэше R-DNS-сервера, то для получения информации о величине оставшегося интервала времени хранения в кэше используются датчики сканирования. Они отправляют через равные периоды времени нерекурсивные DNS-запросы доменного имени D_{name} на R-DNS-сервер. При этом DNS-запросы доменного имени характеризуются случайными интервалами $\hat{\theta}_i$ времени между их поступлениями, а записи в кэше – периодами $\hat{\tau}_j$ обновления (между моментом t_j^k истечения одного периода кэширования и моментом t_{j+1}^H времени начала следующего периода). Периоды кэширования могут быть получены путем активного непрерывного сканирования кэша R-DNS-сервера.

Требуется:

- 1) найти зависимость между периодом $\hat{\tau}_j$ обновления доменной записи в кэше и интервалами $\hat{\theta}_i$ времени между DNS-запросами;
- 2) определить выражение для вычисления значения λ интенсивности потока событий и параметров аппроксимации закона распределения DNS-запросов на DNS-сервер, позволяющие выявлять хосты, запрашивающие вредоносные домены.

МОДЕЛЬ ПОСТУПЛЕНИЯ DNS-ЗАПРОСОВ НА DNS-СЕРВЕР

Необходимо построить модель, описывающую взаимосвязь между периодами $\hat{\tau}_j$ обновления записей в кэше и интервалами $\hat{\theta}_i$ времени между поступлениями DNS-запросов для любого заданного доменного имени. И на основе построенной модели оценить значения интервалов $\hat{\theta}_i$ времени между последовательными DNS-запросами по результатам наблюдения периодов $\hat{\tau}_j$ обновления записи в кэше. Полученные результаты позволят более качественно решать задачи профилирования сетевых объектов в целях обеспечения компьютерной безопасности.

Проведенный анализ [4, 6] показывает, что интервалы $\hat{\theta}_i$ времени между поступлениями DNS-запросов доменного имени D_{name} к R-DNS-серверу образуются путем агрегирования (суммирования) запросов от разных пользователей [7]. Кроме того необходимо учесть, что запросы, поступающие от пользователей, полностью независимы друг от друга, и характеризуются случайными моментами \hat{t}_i времени появления. В связи с этим рассмотрим поток поступления DNS-запросов к R-DNS-серверу как простейший, так как он является самым сложным для обслуживания и при его использовании получается гарантированный по надежности результат. Определим закон распределения событий простейшего потока, происходящих в промежутке времени длины τ_D .

Простейший поток – это стационарный ординарный поток без последствия. На рис. 4 изображен граф состояний процесса $\hat{K}(\tau_D)$ – числа K событий, наступивших на интервале времени $(0; \tau_D]$, где $\Omega_k = [\hat{K}(\tau_D) = k]$. Стрелками показаны возможные переходы процесса $\hat{K}(\tau_D)$ из состояния в состояние. Такой граф будем называть стохастическим. Как видно из рис. 4, возможны переходы процесса $\hat{K}(\tau_D)$ лишь в соседние справа состояния. Это обусловлено тем, что поскольку простейший поток ординарный, то одновременное наступление двух и более событий практически невозможно.

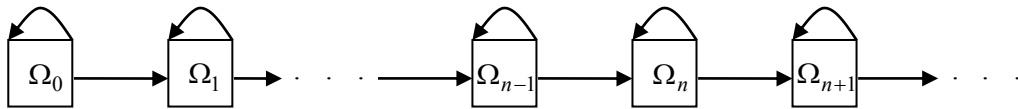


Рис. 4. Граф состояний процесса подсчета запросов

Определим вероятности $P(\Omega_k) = P_k(\tau_D)$, $[k = 1(1)\infty]$ того, что за время τ_D на $(0; \tau_D]$ происходит ровно k событий, используя дифференциальный метод. В соответствии с [8] получаем

$$P_k(\tau_D) = \frac{(\lambda\tau_D)^k}{k!} e^{-\lambda\tau_D}, [k = 0(1)\infty], \quad (3)$$

из которого видно, что число $\hat{K}(\tau_D)$ событий простейшего потока, происходящих в промежутке времени длины τ_D , подчинено закону распределения Пуассона с параметром $\lambda\tau_D$, равным математическому ожиданию случайной величины $\hat{K}(\tau_D)$.

Рассмотрим процесс обновления записей в кэше более подробно. «Состояние кэша» (рис. 5) показывает динамику обновления записи в кэше R-DNS-сервера. Например, если определенная запись уже находится в кэше в момент t_p времени (когда осуществлен нерекурсивный запрос), то R-DNS-сервер возвращает в ответе IP-адрес и оставшееся время до удаления этой записи из кэша (обозначенное как T_l). Получив значения τ_D , T_l и t_p , определяем последний момент времени обновления записи в кэше

$$t_j^H = t_p - (\tau_D - T_l). \quad (4)$$

Обозначим r_j – интервал времени между моментом времени t_j^k истечения последнего периода хранения записи при j -м запросе и моментом времени t_{j+1}^H начала периода его повторного хранения при $(j+1)$ -м запросе. Случайная величина \hat{r}_j используется для обозначения j -й CRI, где $r_j = t_{j+1}^H - t_j^H - \tau_D$, для $j = 1, 2, 3, \dots, m$.

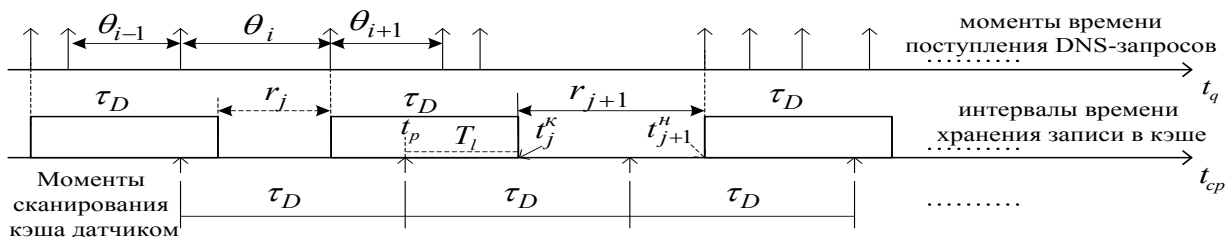


Рис. 5. Модель кэширования на основе значений TTL

Моменты времени обновления записи в кэше R-DNS-сервера зависят от поступления рекурсивных запросов, определим распределение интервалов времени между поступлениями последовательных запросов.

Рассмотрим одно замечательное свойство простейшего потока, для чего обратимся к его заданию в форме временной диаграммы (рис. 6) и определим закон распределения интервалов времени $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots$, разделяющих события этого потока. Заметим, что события $(\hat{\theta}_1 > \theta)$ и $[\hat{K}(\theta) = 0]$ равносильны.

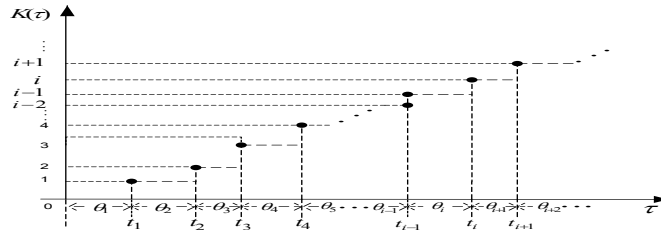


Рис. 6. Временная диаграмма возможной реализации числа событий

Действительно, на отрезке времени $(0, \theta]$ не произойдет ни одного события лишь в том случае, если длина $\hat{\theta}_1$ интервала времени между началом отсчета и моментом наступления первого события потока будет не меньше величины θ этого отрезка. Таким образом, согласно (3)

$$P(\hat{\theta}_1 > \theta) = P[\hat{K}(\theta) = 0] = P_0(\theta) = e^{-\lambda\theta}\Delta(\theta).$$

Используя (5), будем иметь

$$F_{\hat{\theta}_1}(\theta) = P(\hat{\theta}_1 \leq \theta) = 1 - P(\hat{\theta}_1 > \theta) = (1 - e^{-\lambda\theta})\Delta(\theta). \quad (5)$$

Таким образом, все интервалы времени $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots$, между событиями простейшего потока [8] подчинены одному и тому же показательному закону распределения с параметром λ .

Найдем закон распределения величин оставшегося времени \hat{r}_j до наступления ближайшего события потока при условии, что с момента наступления события уже прошло время τ_D , т. е. что произошло событие $\hat{\theta} > \tau_D$ (рис. 7).

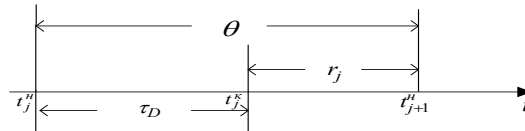


Рис. 7. Временной интервал между периодом хранения записи и началом ее повторного появления в кэше DNS-сервера

Обозначим условную функцию распределения случайной величины $\hat{r}_j = \hat{\theta} - \tau_D$ относительно события $\hat{A} = (\hat{\theta} > \tau_D)$ через $F_{\hat{r}_j/\tau_D}(r_j; \tau_D)$, т. е.

$$F_{\hat{r}_j/A}(r_j) = F_{\hat{r}_j/\tau_D}(r_j; \tau_D) = P(\hat{\theta} - \tau_D \leq r_j | \hat{\theta} > \tau_D).$$

По теореме умножения вероятностей

$$P[(\hat{\theta} > \tau_D) \cap (\hat{\theta} - \tau_D \leq r_j)] = P(\hat{\theta} > \tau_D)P(\hat{\theta} - \tau_D \leq \frac{r_j}{\hat{\theta}} > \tau_D) = R_{\hat{\theta}}(\tau_D)F_{\hat{r}_j/\tau_D}(r_j; \tau_D),$$

откуда

$$F_{\hat{r}_j/\tau_D}(r_j; \tau_D) = \frac{P[(\hat{\theta} > \tau_D) \cap (\hat{\theta} - \tau_D \leq r_j)]}{R_{\hat{\theta}}(\tau_D)}.$$

Заметив, что события $[(\hat{\theta} > \tau_D) \cap (\hat{\theta} - \tau_D \leq r_j)]$ и $(\tau_D < \hat{\theta} \leq \tau_D + r_j)$ равносильны и что $R_{\hat{\theta}}(\tau_D) = 1 - F_{\hat{\theta}}(\tau_D)$, получим равенство

$$F_{\hat{r}_j/\tau_D}(r_j; \tau_D) = \frac{R_{\hat{\theta}}(\tau_D) - R_{\hat{\theta}}(\tau_D + r_j)}{R_{\hat{\theta}}(\tau_D)},$$

из которого согласно (5) следует, что

$$F_{\hat{r}_j/\tau_D}(r_j; \tau_D) = \frac{e^{-\lambda\tau_D} - e^{-\lambda(\tau_D+r_j)}}{e^{-\lambda\tau_D}} \Delta(\tau_D) \Delta(r_j) = (1 - e^{-\lambda r_j}) \Delta(r_j) = F_{\hat{\theta}}(r_j) \quad (6)$$

т. е. закон распределения оставшейся части $\hat{r}_j = \hat{\theta} - \tau_D$ промежутка времени между событиями простейшего потока совпадает с законом распределения длительности $\hat{\theta}$ всего промежутка и, стало быть, любые сведения о времени его протекания не изменяют закон распределения его оставшейся части.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что значения интервалов θ времени распределены по показательному закону распределения и оказывают влияние на период r_j обновления записей в кэше R-DNS-сервера, которые также распределены по тому же закону распределения. В связи с этим, предполагается использовать интенсивность периодов обновлений доменных записей в кэше DNS-серверов для оценки значений характеристик интервалов θ времени между DNS-запросами.

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ ПОСТУПЛЕНИЯ DNS-ЗАПРОСОВ

С достаточной для практики точности можно утверждать, что распределение значений интервалов θ времени между поступления DNS-запросов будет иметь такие же характеристики, как и распределение периодов r_j обновления записей в кэше R-DNS-сервера.

Теоретически экспоненциальное (показательное) распределение может точно описывать последовательность θ_i , когда коэффициент вариации $v_{\hat{\theta}} = 1$. По результатам анализа сетевого трафика СДИ установлено [9], что реальные временные интервалы θ_i имеют значение коэффициента вариации $v_{\hat{\theta}} > 1$. Использование в данных условиях экспоненциального распределения может привести к значительным погрешностям конечных результатов. В этом случае в качестве аппроксимирующей функции закона распределения будем использовать смесь экспоненциальных распределений – гиперэкспоненциальное распределение, функция которого

$$F_{\hat{\theta}_i}(\theta_i) = \begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^n P_i^{(1)} e^{-\lambda_i \theta}, & \theta \geq 0, \lambda_i > 0; \\ 0, & \theta < 0, \end{cases}$$

где $\sum_{i=1}^n P_i^{(1)} = 1$, $P_i^{(1)}$ – весовой параметр, λ_i – частотный параметр.

Следовательно, и оставшиеся части r_j от последнего запроса доменного имени перед окончанием TTL до поступления нового запроса – обновления записи в кэше будут распределены по гиперэкспоненциальному закону распределения

$$F_{\hat{r}_j}(r_j) = \begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^n P_i^{(2)} e^{-\lambda_i r_j}, & r_j \geq 0, \lambda_i > 0; \\ 0, & r_j < 0. \end{cases}$$

Соответственно, распределения имеют одинаковые параметры λ_i , но разные весовые параметры $P_i^{(1)}$ и $P_i^{(2)}$.

Далее оценим параметры распределения θ . Для этого необходимо осуществить:

1. Сбор статистики по $r_j = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ с использованием технологии сканирования кэша DNS-сервера (4).

2. Использование простейшего случая гиперэкспоненциального распределения в виде двух экспоненциальных распределений.

В простейшем случае [10] гиперэкспоненциальное распределение может быть представлено в виде двухфазного распределения (рис. 8).

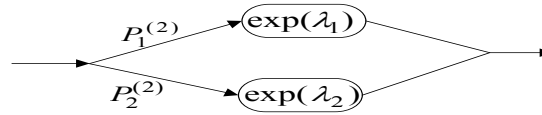


Рис. 8. Двухфазное представление гиперэкспоненциального распределения

Параметрами такого распределения являются: λ_1 и λ_2 – параметры первой и второй экспоненциальных фаз соответственно; $P_1^{(2)}, P_2^{(2)}$ – вероятности формирования значения случайной величины в первой и во второй фазе. Полученное таким образом распределение является трехпараметрическим. Это означает, что аппроксимация таким распределением может выполняться по трем числовым моментам [11]. Тогда

$$\begin{cases} v_1[\hat{r}] = M[\hat{r}] = \frac{P_1^{(2)}}{\lambda_1} + \frac{P_2^{(2)}}{\lambda_2}; \\ v_{\hat{r}}^2 = \frac{2 \left[\frac{P_1^{(2)}}{\lambda_1^2} + \frac{P_2^{(2)}}{\lambda_2^2} \right]}{M[\hat{r}]^2} - 1; \\ v_3[\hat{r}] = 6 \left[\frac{P_1^{(2)}}{\lambda_1^3} + \frac{P_2^{(2)}}{\lambda_2^3} \right], \end{cases}$$

где $P_2^{(2)} = 1 - P_1^{(2)}$, $M[\hat{r}] = \frac{1}{\lambda_i}$. Соответственно, аппроксимация закона распределения гиперэкспоненциальным распределением сводится к определению значений параметров $P_1^{(2)}, \lambda_1, \lambda_2$ в зависимости от известных значений математического ожидания $M[\hat{r}]$, коэффициента вариации $v_{\hat{r}}$, третьего начального момента $v_3[\hat{r}]$ аппроксимируемого закона распределения [12] случайной величины \hat{r}_j . Данные параметры, в свою очередь, позволят довольно точно определить закон распределения интервалов между поступлениями DNS-запросов в выбранный промежуток времени.

Для решения данной задачи предлагается итерационный подход, базирующийся на математических зависимостях, получаемых при аппроксимации закона распределения по двум моментам: математическое ожидание и начальный момент 2-го порядка

$$\begin{aligned} M[\hat{r}] &= P_1^{(2)} M[\hat{r}_1] + (1 - P_1^{(2)}) M[\hat{r}_2]; \\ v_2[\hat{r}] &= 2 \left[P_1^{(2)} M[\hat{r}_1]^2 + (1 - P_1^{(2)}) M[\hat{r}_2]^2 \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда коэффициент вариации гиперэкспоненциального распределения

$$v_{\hat{r}}^2 = \frac{2 \left[P_1^{(2)} M[\hat{r}_1]^2 + (1 - P_1^{(2)}) M[\hat{r}_2]^2 \right]}{M[\hat{r}]^2} - 1,$$

откуда

$$2 \left[P_1^{(2)} M[\hat{r}_1]^2 + (1 - P_1^{(2)}) M[\hat{r}_2]^2 \right] = M[\hat{r}]^2 (v_{\hat{r}}^2 + 1). \quad (8)$$

Из формулы (7) имеем

$$M[\hat{r}_2] = \frac{M[\hat{r}] - P_1^{(2)} M[\hat{r}_1]}{1 - P_1^{(2)}}. \quad (9)$$

Подставив выражение (8) в (7), после преобразований получим

$$2P_1^{(2)} M[\hat{r}_1]^2 - 4P_1^{(2)} M[\hat{r}] M[\hat{r}_1] + \left[1 + P_1^{(2)} - (1 - P_1^{(2)}) v_{\hat{r}}^2 \right] M[\hat{r}]^2 = 0.$$

Решая это квадратное уравнение относительно $M[\hat{r}_1]$, получим

$$M[\hat{r}_1] = \left[1 + \sqrt{\frac{1 - P_1^{(2)}}{2P_1^{(2)}} (v_{\hat{r}}^2 - 1)} \right] M[\hat{r}]. \quad (10)$$

Подставим выражение (9) в (8) и найдем

$$M[\hat{r}_2] = \left[1 - \sqrt{\frac{P_1^{(2)}}{2(1-P_1^{(2)})} (v_{\hat{r}}^2 - 1)} \right] M[\hat{r}]. \quad (11)$$

Так как $M[\hat{r}_2] \geq 0$, то $\frac{P_1^{(2)}}{2(1-P_1^{(2)})} (v_{\hat{r}}^2 - 1) \leq 1$. Отсюда

$$M[\hat{r}_1] \leq \frac{2}{1+v_{\hat{r}}^2}. \quad (12)$$

Соответственно, третий начальный момент гиперэкспоненциального распределения с заданным коэффициентом вариации v принимает минимальное значение $\min v_3[\hat{r}] = 1,5(1 + v_{\hat{r}}^2)^2 M[\hat{r}]^3$ на границе неравенства (11) при $M[\hat{r}_1] = \frac{2}{1+v_{\hat{r}}^2}$, тогда $M[\hat{r}_1] = 0,5(1 + v_{\hat{r}}^2)M[\hat{r}]$ и $M[\hat{r}_2] = 0$. При $M[\hat{r}_1] < \frac{2}{1+v_{\hat{r}}^2}$ третий момент увеличивается и стремится к бесконечности с уменьшением $M[\hat{r}_1]$ до нуля. Таким образом, третий момент двухфазного гиперэкспоненциального распределения в зависимости от $M[\hat{r}_1]$ лежит в интервале от $\min v_3[\hat{r}]$ до ∞ . С учетом этого алгоритм аппроксимации гиперэкспоненциальным вероятностным законом по трем моментам исходного распределения реализуется на основе итерационного подхода, суть которого в следующем [13].

1. По заданному значению коэффициента вариации v определяется верхняя граница вероятности $M[\hat{r}_1]_{\max} = \frac{2}{1+v_{\hat{r}}^2}$.

2. Рассчитывается минимально возможное значение третьего начального момента $\min v_3[\hat{r}] = 1,5(1 + v_{\hat{r}}^2)^2 M[\hat{r}]^3$.

3. Если $v_3[\hat{r}] \leq \min v_3[\hat{r}]$, то для аппроксимации используется однофазное представление гиперэкспоненциального распределения, что позволяет получить верхнюю оценку при расчетах характеристик функционирования DNS-сервера.

4. Если $v_3[\hat{r}] > \min v_3[\hat{r}]$, то, изменяя значения $M[\hat{r}_1]$ по методу половинного деления в интервале $[M[\hat{r}_1]_{\max}; 0]$ и пересчитывая каждый раз значения $M[\hat{r}_1]$ и $M[\hat{r}_2]$ в соответствии с выражениями (10) и (11), рассчитываем третий момент гиперэкспоненциального распределения $v_3[\hat{r}] = 6[P_1^{(2)}M[\hat{r}_1]^3 + (1 - P_1^{(2)})M[\hat{r}_2]^3]$

Вычислив значения $P_1^{(2)}$, λ_1 , λ_2 , находим параметр $P_1^{(1)}$ из уравнения [12]

$$P_1^{(2)} = \frac{P_1^{(1)}}{\lambda_1} \left/ \left(\frac{P_1^{(1)}}{\lambda_1} + \frac{P_2^{(1)}}{\lambda_2} \right) \right;$$

$$P_2^{(2)} = \frac{P_2^{(1)}}{\lambda_2} \left/ \left(\frac{P_1^{(1)}}{\lambda_1} + \frac{P_2^{(1)}}{\lambda_2} \right) \right.$$

где пересчитанная вероятность выбора i -й фазы для распределения остатка θ

$$P_i^{(2)} = \frac{M[\hat{r}_j]}{M[\hat{\theta}_i]} = \frac{P_i^{(1)}}{\lambda_i} \left/ \sum_{i=1}^n \frac{P_i^{(1)}}{\lambda_i} \right.$$

Зная параметры λ_i и $P_i^{(1)}$ распределения θ_i , можно будет построить законы распределений интервалов поступления DNS-запросов на основе этих параметров и оценить их принадлежность к вредоносному коду. В частности, средняя частота λ будет рассчитана следующим образом:

$$\lambda = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{P_i^{(1)}}{\lambda_i}.$$

Для реализации данной задачи была написана программа, которая отправляет специально сформированные нерекурсивные DNS-запросы доменного имени (табл. 1) на выбранный DNS-сервер и из списка с целью получения информации об оставшемся времени пребывания доменной записи в кэше (TTL).

Таблица 1

Список доменных имен

№	Доменное имя	Промежуток времени пребывания в кэше (полные TTL), с
1	dp-medien.eu.net	150
2	oknarai.ru.net	3600
3	smrcek.com.net	300
4	tubemoviez.com.net	300
5	ww38.qfind.net	7200
6	oplatagosuslug.ru.net	900
7	ru2.com	5400

Далее получаем информацию о полных TTL в результате DNS-ответов на запросы типа NS. Программа была запущена на арендованном сервере для сборки статистических данных, в течение 3 дней была собрана необходимая для анализа выборка.

После сбора данных были проведены соответствующие расчеты периодов r обновлений. И в соответствии с разработанным алгоритмом получены весовые коэффициенты и интенсивность поступления DNS-запросов на рассматриваемые доменные имена. Построен график распределения θ (рис. 9).

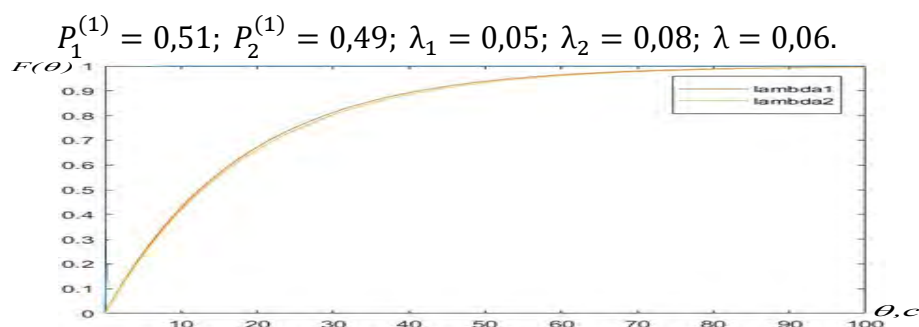


Рис. 9. Распределение значений интервалов времени поступления DNS-запросов к вредоносным доменам

Оценив параметры распределения интервалов времени между DNS-запросами (рис. 10) можно сделать вывод о том, что интенсивность поступления запросов доменного имени DNS-серверу может применяться при описании DNS-операции.

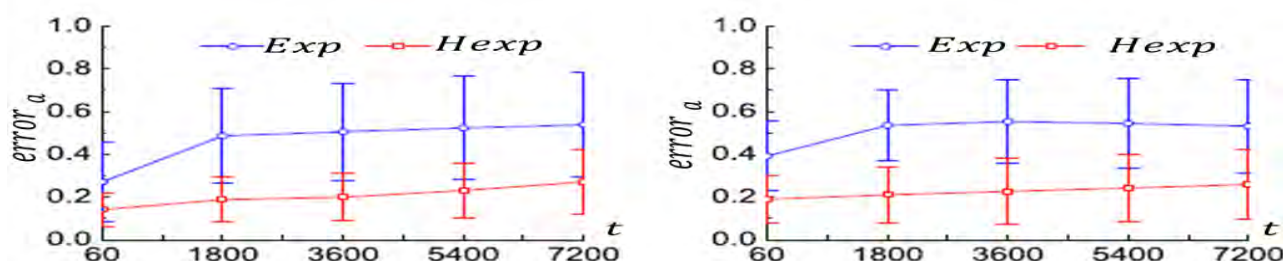


Рис. 10. Погрешности оценки доменов, зараженных ВПО с разными TTL

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие средства выявления зараженных вредоносным программным обеспечением (ВПО) хостов не учитывают взаимосвязь между периодами обновления доменных записей в кэше DNS-сервера и интервалами времени поступления DNS-запросов в качестве признака заражения хоста, использующего СДИ, однако анализ значений данных параметров может расширить возможности средств выявления ВПО.

В связи с тем, что различные зараженные хосты, использующие возможности СДИ в качестве канала для передачи данных и получения команд от центра команд и управления (C&C), передают аналогичные запросы, в том числе и DNS-запросы, то определение интенсивности поступления DNS-запросов на DNS-сервер позволит:

- получить среднее число DNS-запросов доменных имен конечного хоста к R-DNS-серверам;
- оценить число доменов, используемых вредоносным программным обеспечением и, соответственно, зараженные хосты в локальных сетях, где используется R-DNS-сервер.

Так, по результатам исследования в ГКС Интернет были выявлены хосты, использующие СДИ, с подозрительной активностью, которые передавали DNS-запросы с интенсивностью соответствующей вычисленным значениям.

Мониторинг сетевого взаимодействия хостов, зараженных вредоносным программным обеспечением в ГКС Интернет, даст возможность описать распространение вредоносного программного обеспечения и разрабатывать эффективные стратегии смягчения последствий компьютерных атак с использованием СДИ.

В качестве дальнейших исследований необходимо учесть, что интенсивность поступления DNS-запросов с течением времени может меняться, тем самым можно говорить о нестационарности потока (разбивать статистические данные по периодам наблюдения, определить локальные интенсивности и зависимость изменения во времени).

Список используемых источников

1. RFC 1033. – URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1033.txt> (дата обращения: 03.06.2019).
2. RFC 1035. – URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1035.txt> (дата обращения: 03.06.2019).
3. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – С. 648–660.
4. Овчаров В.А., Ломако А.Г., Петренко А.С., Калинин В.Н. Расследование ИБ-инцидентов с использованием профилирования поведения динамических сетевых объектов // Защита информации. Инсайд: журнал. – СПб., 2018. – № 3.
5. Муравьев Н.С., Астахова Л.В. Профилактика инцидентов информационной безопасности на основе профилирования пользователей: программно-технический аспект // Вестник УрФО. – 2018. – №1 (27) – С. 66–70.
6. Данилов В.В. Технологии мониторинга сервисов доменных имен // Материалы 26-й научно-технической конференции «Методы и технические средства обеспечения безопасности информации». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 91–93.
7. Гончаренко В.А. Методика одновременного суммирования нескольких рекуррентных потоков заявок в сетях массового обслуживания // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Вып. 645 – С.13–17.
8. Петухов Г.Б. Основы теории массового обслуживания: учеб. пособие. – Л.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1974. – 250 с.
9. Piscitello D. 5 Ways To Monitor DNS Traffic For Security Threats. – URL: <https://www.darkreading.com/analytics/threat-intelligence> (дата обращения: 03.06.2019)
10. Рыжиков Ю.И. Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – С. 59–67.

11. *Алиев Т.И.* Трехмоментная аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – №2 (90). – С.107–110.
12. *Смагин В.А.* Аппроксимационные методы исследования вычислительных систем и сетей: учеб. пособие. – СПб.: ВИККА им. А.Ф. Можайского, 1996. – 91 с.
13. *Алиев Т.И.* Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №2 (84). – С.88–93.

В.М. Зима,
кандидат техн. наук, доцент;
Р.О. Крюков

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье рассмотрены требования по защите виртуальной инфраструктуры в автоматизированных системах (АС) специального назначения в соответствии с отечественными нормативными документами. Показаны объекты защиты и угрозы безопасности, специфичные для виртуальной инфраструктуры. Определены уровни и меры защиты от угроз для виртуальной инфраструктуры. Рассмотрены сертифицированные средства защиты информации для обеспечения защиты от несанкционированного доступа к информации на уровне среды виртуализации. Предложена методика формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в АС специального назначения, позволяющая снизить информационные риски до требуемого уровня за счет учета угроз и требований, специфичных для технологий виртуализации, а также привязки механизмов защиты к звеньям технологических цепочек обработки информации в виртуальной среде.

Ключевые слова: виртуальная инфраструктура, компьютерная безопасность, защита виртуальной инфраструктуры, информационные риски.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных тенденций в развитии современных АС является широкое использование технологий виртуализации, предполагающих активное применение наряду с физической инфраструктурой виртуальной инфраструктуры компьютерных сетей. Виртуальная инфраструктура эмулируется за счет физической инфраструктуры специализированными операционными системами (ОС), называемыми гипервизорами, функционирующими на специально выделенных серверах виртуализации.

В состав виртуальной инфраструктуры входят:

- виртуальные серверы и сетевые хранилища данных (СХД), предоставляющие соответствующие информационные ресурсы за счет реальной инфраструктуры;
- виртуальная вычислительная сеть, состоящая из виртуального коммуникационного оборудования (виртуальных коммутаторов, маршрутизаторов) и виртуальных каналов связи;
- виртуальные рабочие станции, т. е. виртуальные автоматизированные рабочие места (АРМ), к которым пользователи подключаются с реальных рабочих станций для использования информационных ресурсов, предоставляемых виртуальными серверами и СХД за счет ресурсов реальной инфраструктуры.

Таким образом, технологии виртуализации позволяют создавать на одном сервере виртуализации несколько логических систем – изолированных виртуальных машин – с полным набором функций физических устройств, эмулируемых за счет реальных ресурсов и связанных между собой эмулируемым виртуальным коммуникационным оборудованием. Виртуализация возможна не только в рамках одного физического сервера, но и в рамках нескольких серверов, а также отказоустойчивых кластеров из серверов виртуализации.

Технологии виртуализации снимают полную зависимость информационных сервисов от аппаратного обеспечения, так как обеспечивают быстрое восстановление виртуальной инфраструктуры из образов ее элементов, хранящихся в отказоустойчивых СХД. Кроме того, технологии виртуализации позволяют гибко перераспределять компьютерные ресурсы между виртуальными серверами и эффективнее реализовать модели обслуживания потребителей

информационных ресурсов в компьютерной сети. К основным видам таких моделей обслуживания относятся:

- «платформа как услуга» (*Platform-as-a-Service, PaaS*), предполагающая возможность создавать виртуальные машины АРМ и серверов;
- «инфраструктура как услуга» (*Infrastructure-as-a-Service, IaaS*), предполагающая возможность создавать виртуальные локальные вычислительные сети (ЛВС);
- «программное обеспечение как услуга» (*Desktop-as-a-Service, DaaS*), предполагающая возможность совместного доступа штатных пользователей к приложениям, функционирующим в виде сервисов, например, по технологии *RemoteApp*, на виртуальных серверах, а также доступа к функциям специального программного обеспечения (СПО), компоненты которого распределены по виртуальным машинам в соответствии с архитектурой «клиент-сервер».

Вместе с тем применение технологий виртуализации способствует возникновению дополнительных угроз информационной безопасности (ИБ), для которых не применимы традиционные для физической инфраструктуры средства и методы защиты. Появление дополнительных угроз ИБ, неспецифичных для физической инфраструктуры, повышает уровень информационных рисков АС, использующих технологии виртуализации. Для повышения безопасности АС, использующих технологии виртуализации, и предотвращения реализации угроз путем эксплуатации уязвимостей, применяются контрмеры, но и после их введения могут сохраняться остаточные уязвимости (рис.1). Поэтому актуальной задачей является снижение информационных рисков АС, использующих технологии виртуализации до приемлемого уровня путем устранения уязвимостей (слабых мест), на основе управления доступом к информации в виртуальной среде и применения средств защиты в виртуальной инфраструктуре.

Предложенная методика формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в АС специального назначения отличается тем, что в ней при выработке контрмер, перекрывающих специфичные для виртуальной инфраструктуры угрозы ИБ, учитываются технологические цепочки обработки информации, а также применяются дополнительные механизмы защиты для самих средств защиты информации в виртуальной инфраструктуре.

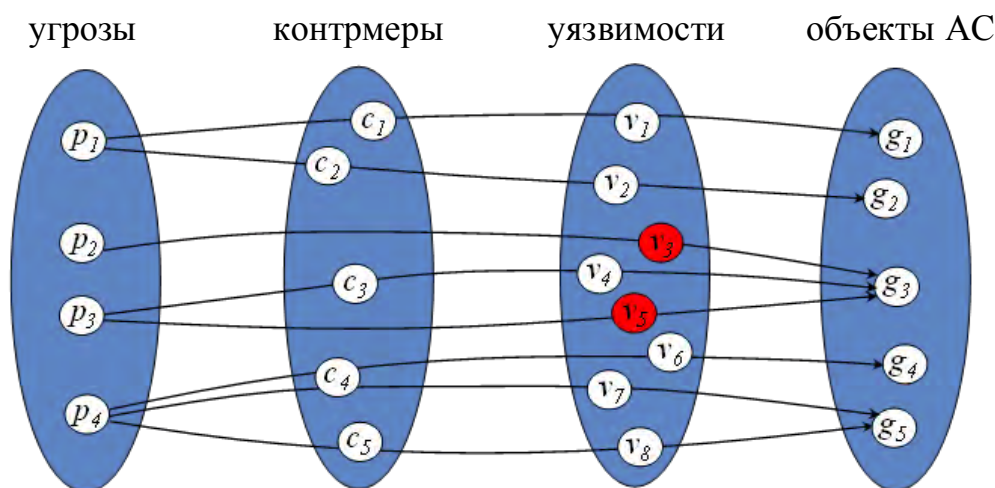


Рис. 1. Взаимосвязь входных данных для методики формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в автоматизированных системах специального назначения

Постановка задачи формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в автоматизированных системах специального назначения:

дано: множества (G, K, V, P), которые представляют следующие обозначения:

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ – множество объектов АС, использующих технологию виртуализации;

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_q\}$ – множество средств защиты информации для объектов АС, использующих технологию виртуализации;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ – множество уязвимостей объектов АС, использующих технологию виртуализации;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_s\}$ – множество угроз ИБ для объектов АС, которые выражаются через вероятность их реализации.

Приемлемый информационный риск $R_n \leq 0,2$.

Требуется: оценить и при необходимости снизить информационные риски АС, использующих технологии виртуализации до приемлемого уровня ($R \leq R_n$).

Имеются ограничения. В данной работе рассматриваются только целенаправленные угрозы, обусловленные человеческим фактором, источником которых является злоумышленник.

Задача решается путем устранения уязвимостей (слабых мест) на основе управления доступом к информации в виртуальной среде и применения средств защиты в виртуальной инфраструктуре.

Ниже рассмотрены особенности решения этой задачи для АС, использующей технологии виртуализации.

ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В качестве объектов защиты, специфичных для виртуальной инфраструктуры, выступают следующие объекты:

- виртуальные вычислительные системы (виртуальные машины – VM);
- средства управления виртуальной инфраструктурой (ВМ управления средой виртуализации);
- виртуальная вычислительная сеть;
- отдельные виртуальные устройства обработки, хранения и передачи данных (виртуальные процессоры, диски, память, виртуальное сетевое оборудование и др.);
- гипервизоры, формирующие среду виртуализации;
- серверы виртуализации, на которых функционируют гипервизоры.

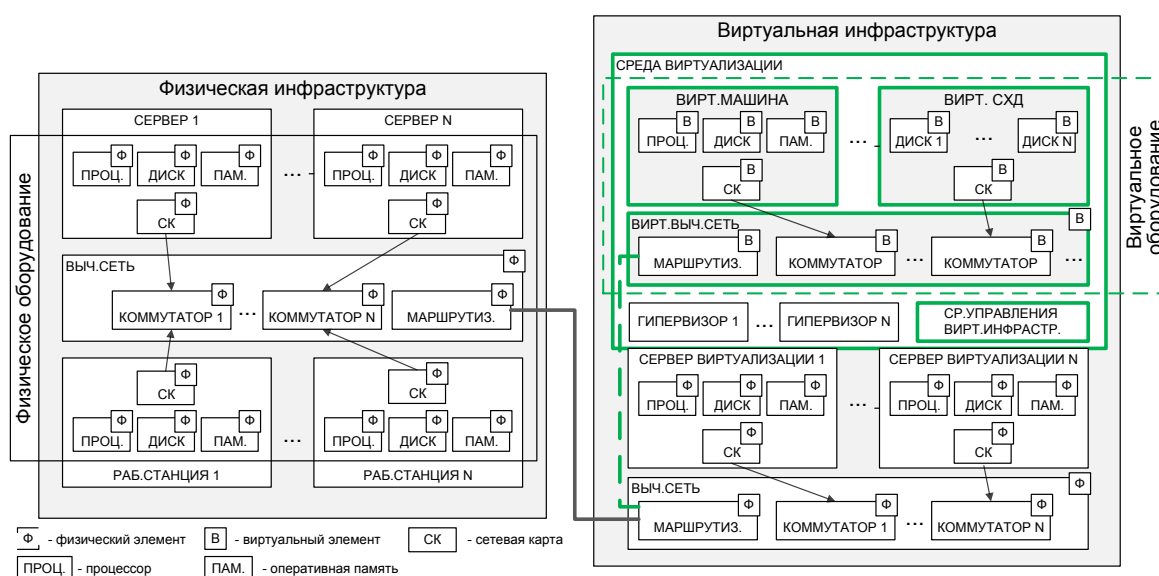


Рис. 2. Физическая (слева) и виртуальная (справа) инфраструктуры компьютерных сетей

На рис. 2 наглядно представлены элементы физической и виртуальной инфраструктур. При этом элементы виртуальной инфраструктуры эмулируются с помощью программных гипервизоров, формирующих среду виртуализации и функционирующих на реальных серверах виртуализации.

Целесообразно выделить перечень угроз, характерных для виртуальной инфраструктуры:

- угрозы загрузки нештатной ОС на серверах виртуализации и виртуальных машинах;
- угрозы маскировки под зарегистрированного пользователя при доступе к среде виртуализации (гипервизору) и виртуальным машинам;
- угрозы хищения, подлога и модификации данных внутри виртуальных машин;
- угрозы возникновения ошибок в управлении доступом к среде виртуализации (гипервизору) и ресурсам виртуальных машин, например неправильное назначение полномочий пользователям;
- угрозы несанкционированного сетевого взаимодействия внутри виртуальной сетевой инфраструктуры;
- угрозы несанкционированной маршрутизации сетевого трафика внутри виртуальной инфраструктуры;
- угрозы несанкционированного изменения, копирования, перемещения (миграции) виртуальных машин и обрабатываемых на них данных;
- угрозы внедрения программных вирусов и закладок в среду виртуализации (гипервизор) и внутрь виртуальных машин;
- угрозы компрометации подсистемы защиты инфраструктуры виртуальных машин (отсутствия информации о событиях НСД, перехвата управления средой виртуализации, нарушения целостности программного обеспечения (ПО), изменения параметров функционирования средств защиты и др.);
- угрозы потери данных внутри виртуальной инфраструктуры и нарушения работоспособности виртуальных машин.

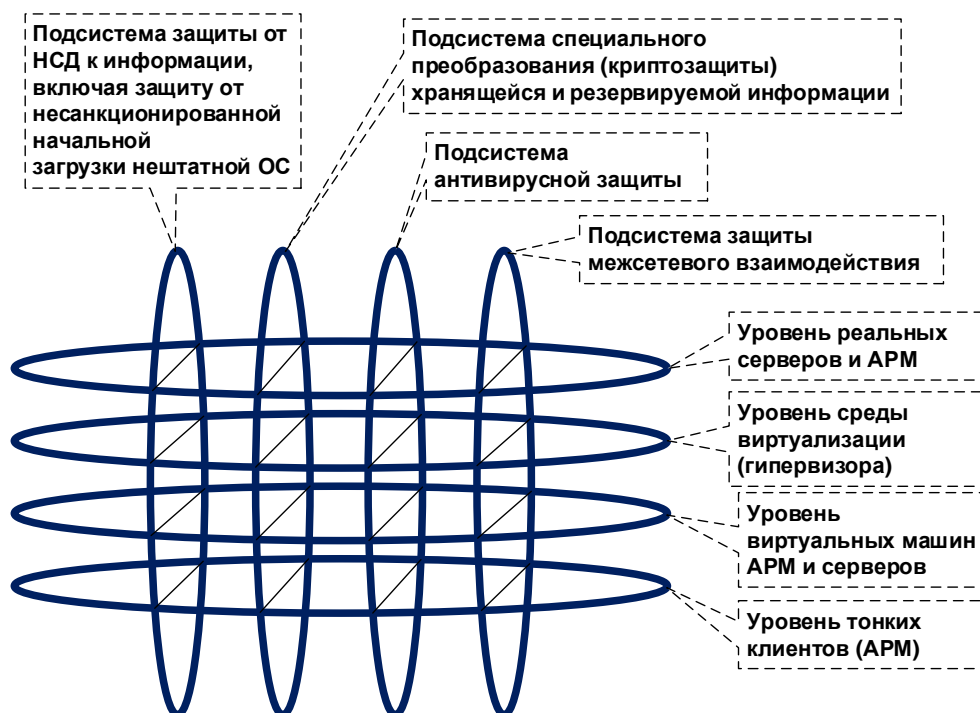


Рис. 3. Уровни и подсистемы защиты виртуальной инфраструктуры

С целью нейтрализации угроз для виртуальной инфраструктуры в АС должны быть предусмотрены разные уровни защиты с реализацией соответствующих подсистем (рис. 3):

- уровень тонких клиентов (АРМ), с которых пользователи осуществляют доступ к виртуальным машинам АРМ и серверов;
- уровень виртуальных машин АРМ и серверов, функционирующих в среде виртуализации;
- уровень среды виртуализации (гипервизора), обеспечивающей работоспособность виртуальных машин;
- уровень реальных серверов и АРМ.

Нормативные требования по защите виртуальной инфраструктуры раскрыты в ряде отечественных нормативных документов [1, 4–6].

При формировании требований по защите виртуальной инфраструктуры важно учитывать также звенья технологических цепочек обработки информации в АС, что позволит адаптировать меры защиты применительно к структурно-функциональным характеристикам информационной системы, используемым технологиям, а также к конкретным условиям обработки информации.

В соответствии с приказами ФСТЭК России № 17 от 2013 г. и № 27 от 2017 г., механизмы защиты среды виртуализации должны исключать несанкционированный доступ к информации, обрабатываемой в виртуальной инфраструктуре, и к компонентам виртуальной инфраструктуры, а также исключать воздействие на информацию и компоненты, в том числе на средства управления виртуальной инфраструктурой, виртуальные машины (гипервизоры), системы хранения данных (включая систему хранения образов виртуальной инфраструктуры), сеть передачи данных через элементы виртуальной или физической инфраструктуры.

Защита от несанкционированного доступа к информации на уровне среды виртуализации в настоящий момент может быть реализована на основе следующих сертифицированных средств:

- средства защиты платформ виртуализации *vGate-S R2* для виртуальной инфраструктуры на базе *VMware vSphere* [7], а также *vGate R2* для гипервизора *Hyper-V* из состава *Windows Server*;
- программного комплекса виртуализации и управления (ПК «ВИУ»), а также программного комплекса «Средства виртуализации «Брест» (ПК СВ «Брест») для ОС *Astra Linux Special Edition (Astra Linux SE)*.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предлагается методика формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в АС специального назначения, в которой учитываются угрозы ИБ, специфичные для виртуальной инфраструктуры. Методика предполагает выполнение следующих этапов:

- 1) формирование списка и схемы размещения защищаемых объектов информатизации в инфраструктуре виртуальных машин (информационных ресурсов, сервисов, сетевых объектов и др.);
- 2) составление списка угроз защищаемым объектам АС;
- 3) составление списка уязвимостей (слабых мест в системе защиты), использование которых в инфраструктуре виртуальных машин может привести к реализации выявленных угроз;

4) формирование модели нарушителя, в которой необходимо классифицировать нарушителей по характеру возможностей, которые могут быть ими использованы для нарушения безопасности защищаемых объектов;

5) по отношению к каждой выявленной угрозе оценивание текущих информационных рисков (рисков до принятия контрмер), находящихся в прямой зависимости от возможной частоты проявления угрозы, простоты использования уязвимости нарушителем и потенциально возможного ущерба при реализации угрозы;

6) выработка контрмер, перекрывающих выявленные угрозы и предпринимаемых для уменьшения уязвимостей, делающих возможной реализацию этих угроз;

7) апробация средств защиты, в процессе которой необходимо исследовать различные режимы их функционирования с целью поиска оптимальной конфигурации, обеспечивающей максимальную степень стойкости защиты;

8) формирование схемы размещения средств защиты в виртуальной инфраструктуре, а также режимов функционирования и параметров конфигурации, обеспечивающих максимальную степень стойкости защиты;

9) определение порядка реализации контрмер и применения рассматриваемых средств защиты;

10) выработка рекомендаций по поддержанию принятых контрмер в актуальном состоянии, исключая рост имеющихся и появление новых уязвимостей;

11) по отношению к каждой выявленной угрозе оценивание остаточных информационных рисков (рисков после принятия контрмер), находящихся в прямой зависимости от возможной частоты проявления угрозы, простоты использования уязвимости нарушителем и потенциально возможного ущерба при реализации угрозы.

В идеальном случае при апробации средств защиты в АС, использующих технологии виртуализации, а также при испытаниях системы защиты информации разработчики должны смоделировать работу команды злоумышленников по планированию, подготовке и реализации сложных атак – так называемых АРТ-атак (от англ. *Advanced Persistent Threat* – сложная целенаправленная атака). Такое моделирование называют еще тестированием системы защиты на проникновение (*penetration testing*, жарг. *pentest*, пентест). Суть такой работы заключается в санкционированной попытке обойти апробируемый или существующий комплекс средств защиты виртуальной инфраструктуры. Для объективности результата тестирования на проникновение должна выполнять команда специалистов (экспертов), независимая от разработчиков.

Методика оценивания информационных рисков, предполагающая расчет интегрального показателя на основе декомпозиции факторов рисков, отражающих опасность возникновения ущерба в результате реализации угроз информации, описана в работе [2].

При выработке контрмер, перекрывающих выявленные угрозы и предпринимаемых для уменьшения уязвимостей, появление которых делает возможной реализацию этих угроз, необходимое снижение информационных рисков возможно только при учете технологических цепочек обработки информации в инфраструктуре виртуальных машин.

В ЛВС, построенной на базе инфраструктуры виртуальных машин, как правило, реализуются технологические цепочки обработки информации двух видов:

- технологические цепочки администрирования;
- технологические цепочки по выполнению прикладных функций.

Технологические цепочки администрирования включают:

- взаимодействие с серверными и управляющими подсистемами серверов АС;
- взаимодействие с агентами и клиентскими подсистемами виртуальных машин;
- взаимодействие с серверными и управляющими подсистемами, а также агентами и клиентскими подсистемами виртуальных серверов и АРМ.

Цепочки администрирования обеспечивают решение задач управления ЛВС, включая сегмент разработки, а также управления защитой информации от несанкционированного доступа на основе *трех типовых функций*, реализуемых специализированными программно-аппаратными средствами:

- получения информации о состоянии управляемых объектов;
- анализа полученной информации и выработки управляющих воздействий;
- передачи управляющих воздействий на исполнение.

Особенности реализации каждой технологической цепочки администрирования определяются архитектурными особенностями, положенными в основу построения подсистем управления инфраструктуры виртуальных машин. К наиболее важным архитектурным особенностям используемых средств относят следующие реализованные разновидности сетевых архитектур:

- архитектуру «агент-менеджер»;
- архитектуру «клиент-сервер».

Пользователи связаны с двумя основными технологическими цепочками по выполнению прикладных функций, к которым относятся:

- взаимодействие с виртуальными машинами АРМ и серверов посредством тонких клиентов (АРМ-Т);
- работа на АРМ ввода-вывода (АРМ-ВВ) с бумажными документами и взаимодействие с ВМ для сохранения результатов работы.

Защита от несанкционированного доступа при реализации технологических цепочек обработки информации в ЛВС должна обеспечиваться сертифицированными средствами защиты информации (СрЗИ), например:

- аппаратным модулем доверенной загрузки «Соболь» версии 3.0 с электронными ключами *iButton*;
- средством защиты информации от НСД *Secret Net*;
- генератором паролей «Генератор»;
- средством защиты инфраструктуры виртуальных машин *vGate-S R2*;
- средством специального преобразования хранящейся информации *Zecurion Zserver*;
- *СAB3 Kaspersky Endpoint Security*.

В цепочках по выполнению прикладных функций в соответствии с используемой схемой обработки информации выделяются следующие типовые звенья (рис.4):

- обработка информации в рамках сеанса работы пользователей на закрепленных за ними АРМ (АРМ-Т, АРМ-ВВ);
- обмен информацией между физическим и виртуальным АРМ (ВМ АРМ) по протоколу доступа к удаленному рабочему столу этой ВМ (RDP, PCoIP или VMware Blast);
- обработка информации на ВМ АРМ, функционирующей в среде виртуализации;
- обмен информацией между ВМ АРМ и ВМ серверов обработки/приложений/баз данных, функционирующих в среде виртуализации, по протоколам предоставления информационных сервисов;
- обработка информации на ВМ серверов обработки/приложений/баз данных, функционирующих в среде виртуализации;
- обмен информацией между ВМ серверов обработки/ приложений/баз данных по протоколам предоставления информационных сервисов;
- доступ к сетевым хранилищам информации (СХД) и накопление информации в СХД.

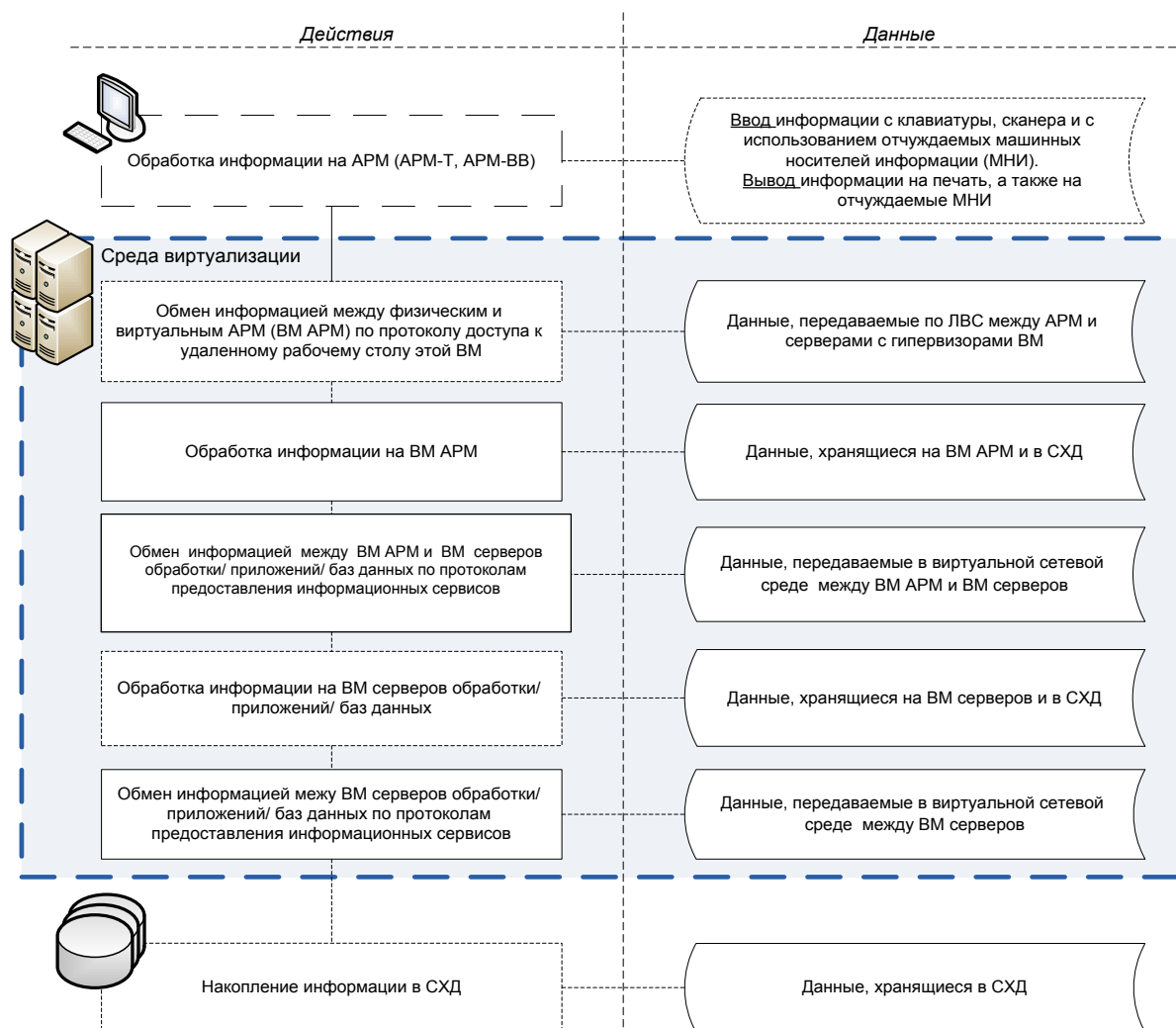


Рис. 4. Типовые звенья технологических цепочек обработки информации в ЛВС на базе инфраструктуры виртуальных машин

Для защиты самих средств защиты информации в виртуальной инфраструктуре целесообразно использовать следующие механизмы [3]:

- механизмы обеспечения доверенной загрузки средств вычислительной техники, реализуемые на физических АРМ и серверах аппаратным модулем доверенной загрузки (АПМДЗ) «Соболь», а на виртуальных АРМ и серверах – средством защиты инфраструктуры виртуальных машин *vGate-S R2*;
- механизмы контроля целостности программного обеспечения, включая ПО средств защиты информации, реализуемые АПМДЗ «Соболь», средством защиты информации от НСД *Secret Net*, а также средством защиты инфраструктуры виртуальных машин *vGate-S R2*;
- механизмы обеспечения замкнутой программной среды, реализуемые средством защиты информации от НСД *Secret Net*;
- механизмы регистрации и контроля действий пользователей, реализуемые средством защиты информации от НСД *Secret Net*.

Результаты оценки информационных рисков АС, состоящей из трех ЛВС, построенных на базе виртуальных машин при отсутствии и наличии контрмер, приведены в таблицах (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Показатели рисков АС при отсутствии контрмер

Идентификатор показателя	Показатель рисков (R_{kj})	Ранг рисков	Весовой коэффициент показателя рисков (C_{kj})	Значение $R_{kj} * C_{kj}$
R_1	0,43297	5	0,71429	0,30926
R_2	0,30885	1	0,14286	0,04412
R_3	0,30885	1	0,14286	0,04412
Значение интегрального показателя рисков R для АС без контрмер				0,39751

Таблица 2

Показатели остаточных рисков АС при наличии контрмер

Идентификатор показателя	Показатель рисков (R_{kj})	Ранг рисков	Весовой коэффициент показателя рисков (C_{kj})	Значение $R_{kj} * C_{kj}$
R_1	0,23610	5	0,71429	0,16865
R_2	0,10804	1	0,14286	0,01543
R_3	0,10804	1	0,14286	0,01543
Значение интегрального показателя рисков R для АС с контрмерами				0,19952

В таблицах интегральный показатель рисков R для АС специального назначения, использующих технологии виртуализации, вычисляется по формуле

$$R_k = \sum_{i=1}^L (R_{ki} * C_{ki}), \quad (1)$$

где L – число подчиненных показателей рисков нижестоящего уровня, иерархических для показателя R_{ki} ;

R_{ki} – подчиненный i -й показатель рисков для ЛВС, построенных на базе инфраструктуры виртуальных машин, входящих в состав АС специального назначения;

C_{ki} – весовые коэффициенты показателей рисков R_{ki} ;

Сумма весовых коэффициентов (C_{kj}) принимается равной единице:

$$\sum_{i=1}^L C_{ki} = \text{Const} = 1. \quad (2)$$

Показатели рисков R_{kj} для ЛВС, построенных на базе инфраструктуры виртуальных машин, входящих в состав АС, по отношению к каждой угрозе t_i (в соответствии с ГОСТ Р 51275) вычисляются по следующей формуле:

$$R_{ki} = P_i * V_i * L_i, \quad (3)$$

где $P_i, V_i, L_i \in (0,1)$. В формуле (3) введены следующие обозначения:

P_i – показатель угрозы, выражающийся через вероятность ее реализации и характеризующий возможную частоту проявления угрозы;

V_i – показатель уязвимости, выражающийся через степень уязвимости объекта АС или механизма защиты, перекрывающего соответствующую угрозу, – характеризует простоту использования уязвимости при реализации угрозы;

L_i – показатель ресурса, выражающийся через степень потенциального негативного воздействия на выполнение соответствующей целевой функции и характеризующий потенциально возможный ущерб при реализации угрозы.

Определение значений показателей P_i , V_i , L_i осуществляется экспертным методом группой экспертов-специалистов, компетентных в решении данной задачи, на базе их опыта и интуиции. Итоговое значение каждого из данных показателей получается путем усреднения всех значений, назначенных данному показателю разными экспертами.

В приведенном примере применение методики формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в АС специального назначения, в которой учитываются угрозы ИБ, специфичные для виртуальной инфраструктуры, позволило снизить уровень остаточного риска ($R_{ост} = 0,19952$) до приемлемого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен практический подход к формированию защищенной виртуальной инфраструктуры в АС специального назначения, позволяющий минимизировать информационные риски [2] за счет учета угроз по ГОСТ Р 56938 и требований нормативных документов ФСТЭК России, специфичных для технологий виртуализации. Раскрыты особенности привязки механизмов защиты к звеньям технологических цепочек обработки информации в виртуальной среде на примере виртуальной инфраструктуры, построенной с помощью *VMware vSphere* и средства защиты платформ виртуализации *vGate-S R2*.

Детальные угрозы безопасности виртуальной инфраструктуры в соответствии с ГОСТ Р 56938 можно разделить на три группы:

- 1) угрозы несанкционированного доступа к функциям управления гипервизорами и средой виртуализации;
- 2) угрозы, связанные с наличием уязвимостей в гипервизорах, физическом и виртуальном оборудовании, в частности, в реализации функций эмуляции компьютерных ресурсов в виртуальной среде;
- 3) угрозы несанкционированного доступа к информационным ресурсам (в виртуальном пространстве, СХД) и физическому оборудованию.

В предложенном в статье варианте контрмер средства управления гипервизорами и виртуальной инфраструктурой защищены от несанкционированного доступа с помощью *vGate S R2* за счет расположения в отдельном логическом сетевом сегменте, недоступном для штатных пользователей, усиленной аутентификации администраторов, дискреционного и мандатного разграничения доступа к *ESXi*-серверам, серверу *vCenter*, а также блокирования любого сетевого трафика со стороны виртуальных машин (ВМ) к средствам управления гипервизорами и виртуальной инфраструктурой.

В соответствии с типовой моделью нарушителя администраторы являются доверенными лицами, у внешних нарушителей доступ на территорию контролируемой зоны отсутствует, а штатные пользователи в качестве внутренних нарушителей могут предпринимать попытки расширения своих полномочий и преодоления средств защиты с использованием только штатных программных и технических средств, причем в этих средствах не предусмотрены функции, которые могут использоваться для эксплуатации уязвимостей в гипервизорах, физическом и виртуальном оборудовании.

Доступ к информационным ресурсам, моделируемым гипервизорами за счет ресурсов СХД как на уровне реальных средств, так и на уровне среды виртуализации, разграничивается сертифицированным диспетчером доступа, в качестве которого выступает клиент *Secret Net*, установленный на все реальные и виртуальные АРМ и серверы, с которых осуществляется этот доступ. Физическое сетевое оборудование, серверы виртуализации, эмулирующие виртуальное сетевое оборудование, а также СХД должны быть размещены в отдельных закрытых помещениях, доступ в которые имеют только администраторы.

Применение предложенной в статье методики формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в АС специального назначения позволяет предотвратить угрозы ИБ путем

устранения слабых мест АС на основе управления доступом к информации и применения средств защиты в виртуальной инфраструктуре.

Эксперименты по применению методики формирования защищенной виртуальной инфраструктуры в АС специального назначения показали, что при условии учета угроз, специфичных для виртуальной инфраструктуры, информационные риски АС могут быть снижены до 20%.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 56938-2016. Защита информации. Защита информации при использовании технологий виртуализации. Общие положения. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200135524> (дата обращения: 20.01.2019).
2. Зима В.М. Методика оценивания информационных рисков при разработке и совершенствовании систем компьютерной безопасности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 652.
3. Зима В.М., Новиков С.В., Андрушкевич Д.В. Подход к построению защищенных распределенных сетей обработки данных на основе доверенной инфраструктуры // Труды СПИИРАН. – СПб.: Наука, 2015. – Вып. 1(38)3, т. 1. – С.34–57.
4. Меры защиты информации в государственных информационных системах: методический документ. – ФСТЭК России, 2014.
5. Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах: приказ ФСТЭК России № 17 от 2013 года. – URL: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702-prikaz-fstek-rossii-ot-11-fevralya-2013-g-n-17?highlight=> (дата обращения: 20.01.2019).
6. О внесении изменений в Требования о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах, утвержденные приказом Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 11 февраля 2013 года № 17: приказ ФСТЭК № 27 от 2017 года. – URL: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1270-prikaz-fstek-rossii-ot-15-fevralya-2017-g-n-27> (дата обращения: 20.01.2019).
7. Bolander B., Kusek C. vSphere Design Best Practices. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2014.

М.С. Бродский;
К.И. Витензон;
П.А. Проценко,
кандидат техн. наук;
С.В. Янов,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ РАДИОКОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Предложен математический подход к планированию применения средств радиоконтроля функционирования космических аппаратов связи, основанный на использовании одного из двух математических методов: венгерского алгоритма или метода отыскания максимальной взвешенной клики. Сравнительное использование этих методов для решения данной задачи позволило выявить их достоинства и недостатки и сформулировать рекомендации по их применению.

Ключевые слова: планирование применения, космический аппарат связи, венгерский алгоритм, максимальная взвешенная клика.

ВВЕДЕНИЕ

В 2001 году, в целях обеспечения деятельности Администрации связи Российской Федерации (РФ) по выполнению международных обязательств по эффективному использованию орбитально-частотного ресурса, оперативному обнаружению и устранению помех в спутниковых сетях связи и с целью взаимодействия с зарубежными системами спутникового радиоконтроля государственной комиссией по радиочастотам, было признано целесообразным создание в Российской Федерации системы радиоконтроля за использованием орбитально-частотного ресурса радиоэлектронными средствами спутниковых радиослужб [1].

К основным задачам системы спутникового радиоконтроля относят:

- обнаружение и идентификацию нелегального использования радиоэлектронного оборудования ретрансляторов космических аппаратов (КА);
- контроль технических характеристик передатчиков космических аппаратов связи на их соответствие заявленным;
- исследование и устранение помех в космических радиоперелиниях;
- определение занятости ствола ретранслятора КА.

Согласно постановлению Правительства РФ от 17 августа 2016 года №806, Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций с 1 января 2018 года перешла на риск-ориентированный подход, заключающийся в изменении интенсивности проверок объектов в зависимости от риска причинения ущерба пользователям радиочастотного спектра. Данный шаг требует пересмотра принципов функционирования средств радиоконтроля (СР).

В качестве возможных направлений развития и совершенствования средств радиоконтроля за излучениями радиоэлектронных средств гражданского назначения в Российской Федерации выделены следующие [2]:

- включение в содержание радиоконтроля мероприятий, планируемых на основе риск-ориентированного подхода. Данный шаг позволит сократить затраты на выявление признаков нарушений;

– внедрение гибкого планирования мероприятий радиоконтроля по сетям радиосвязи, полосам частот, радиотехнологиям, территориям, позволяющего сконцентрировать внимание на объектах радиоконтроля с высоким риском нарушений;

– оптимизация структуры средств радиоконтроля.

Помимо этого был существенно расширен перечень задач и полномочий, закрепленных за радиочастотной службой [3].

В целях качественного выполнения новых задач требуются перераспределение имеющихся сил и средств для повышения эффективности их использования, а также пересмотр принципов планирования и проведения мероприятий радиоконтроля.

Таким образом, актуальность рассматриваемого в данной статье вопроса не вызывает сомнений.

ОСНОВЫ РАДИОКОНТРОЛЯ КАНАЛОВ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Использование КА-связи заключается в организации каналов связи между двумя РЭС абонентов. Например, между абонентами 1 и 2 организован канал связи через КА-связи (рис. 1). Радиоконтроль КА-связи осуществляется наземными СР в момент передачи информации от КА-связи до абонента 1. Ширина диаграммы направленности при передаче информации составляет порядка $1-2^0$, что не позволяет размещать средства контроля радиоканалов на достаточном удалении (порядка 1500 – 2000 км) от абонентских станций. При этом возможность контроля каждого из каналов связи определяется взаимным расположением абонентов, КА-связи и СР.

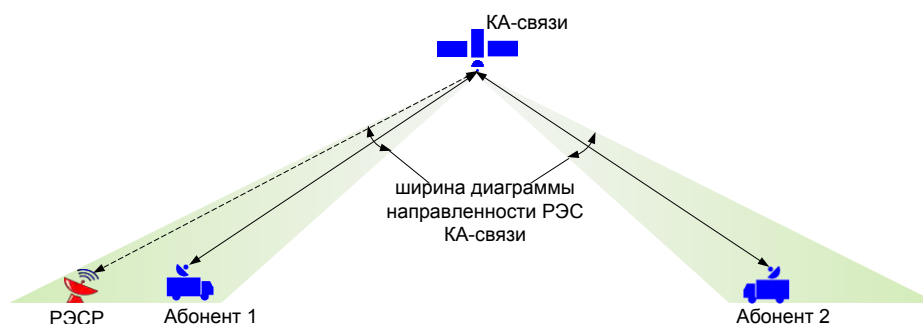


Рис. 1. Схема радиоконтроля канала связи

Радиоконтроль систем КА-связи осуществляется с целью контроля использования орбитально-частотного ресурса путем проведения измерений и инструментальных оценок параметров излучений радиоэлектронных средств [4]. В соответствии с «Концепцией развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств...», одним из основных показателей эффективности работы системы радиоконтроля является полнота охвата абонентов радиоэлектронных средств [2]. Таким образом, эффективность проведения радиоконтроля определяется отношением числа каналов, контроль которых осуществляется, к общему числу каналов.

В настоящее время на территории России определены около 60000 абонентских станций, подлежащих радиоконтролю [5]. Их расположение представлено на рис. 2. Задание расположения каждого РЭС абонента, в рамках данных исследований, является трудновыполнимой задачей. Для упрощения процедуры оценивания эффективности радиоконтроля примем допущение: пусть множество абонентов задаются некоторым множеством непересекающихся районов, в которых расположено известное число абонентов. Пусть абоненты в районах рас-

положены равномерно. Для каждого района рассчитывается весовой коэффициент, равный количеству абонентов, находящихся в данном районе.

Часть района будем называть обеспеченной связью данным КА-связи, если можно организовывать канал связи между абонентом, находящимся в любой точке рассматриваемой части района, с заданным КА-связи.

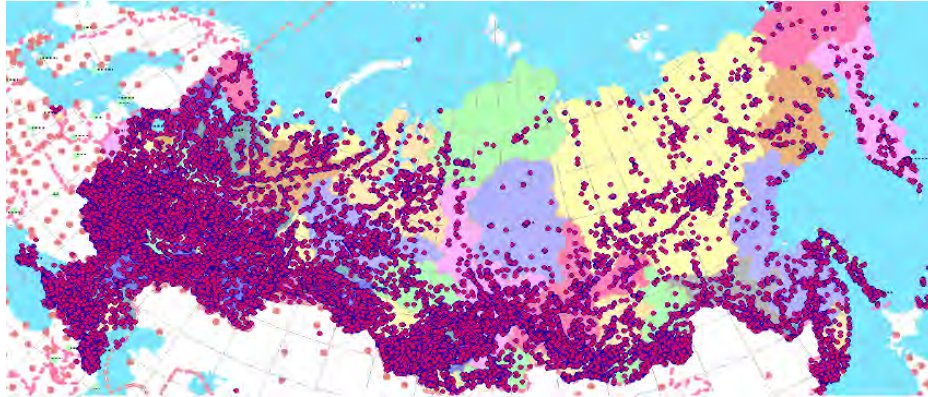


Рис. 2. Расположение абонентских станций

Часть района, обеспеченную связью данным КА-связи, будем называть обслуживаемой данным СР, если можно осуществлять контроль канала абонента, находящегося в любой точке рассматриваемой части района при работе РЭС по заданному КА-связи.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ РАДИОКОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Пусть заданы:

1. Множество X кортежей параметров КА-связи, каналы которых подлежат радио-контролю (КА-связи находятся на геостационарной орбите, и поэтому их расположение задается долготами точек стояния), определяемое как

$$X = \{ \langle L_i^{\text{КА}}, e_i^{\text{КА}} \rangle, e_i^{\text{КА}} = (\lambda_{ni}^{\text{КА}}, G_i^{\text{КА}}, P_i^{\text{КА}}), i = \overline{1, N} \},$$

- где
- $L_i^{\text{КА}}$ – долгота точки стояния i -го КА-связи;
 - $e_i^{\text{КА}}$ – набор параметров бортовой аппаратуры i -го КА-связи;
 - $\lambda_{ni}^{\text{КА}}$ – длина несущей радиоволны, используемой для передачи сообщения с борта i -го КА-связи;
 - $G_i^{\text{КА}}$ – коэффициент усиления передающей антенны i -го КА-связи;
 - $P_i^{\text{КА}}$ – мощность, излучаемая передающей антенной i -го КА-связи;
 - N – количество КА-связи.

2. Множество S кортежей параметров СР:

$$S = \{ \langle \psi_j^p, \lambda_j^p, e_j^p \rangle, e_j^p = (G_j^p, P_j^p), j = \overline{1, M} \},$$

- где
- ψ_j^p – широта расположения j -го СР;
 - λ_j^p – долгота расположения j -го СР;
 - e_j^p – набор параметров аппаратуры j -го СР;
 - G_j^p – коэффициент усиления приемной антенны j -го СР;

P_i^p – чувствительность приемной антенны j -го СР;

M – количество СР.

3. Множество R кортежей параметров районов расположения абонентов КА-связи,

$$R = \{ \langle \psi_{сз k}^a, \lambda_{сз k}^a, \psi_{юв k}^a, \lambda_{юв k}^a, e_k^a, \omega_k^a \rangle, e_k^a = (G_k^a, P_k^a), k = \overline{1, K} \},$$

где $\psi_{сз k}^a, \lambda_{сз k}^a$ – широта и долгота северо-западной точки k -го района;

$\psi_{юв k}^a, \lambda_{юв k}^a$ – широта и долгота юго-восточной точки k -го района;

e_k^a – набор параметров аппаратуры абонента, находящегося в k -м районе;

ω_k^a – количество абонентов в k -м районе;

G_k^a – коэффициент усиления приемной антенны абонента, находящегося в k -м районе;

P_k^a – чувствительность приемной антенны абонента, находящегося в k -м районе;

K – количество районов.

Весовой коэффициент $\Omega_{чр k i}$ обеспеченности связью части k -го района i -м КА-связи можно рассчитать по формуле

$$\Omega_{чр k i} = S_{ч k i} \frac{\omega_k^a}{S_k},$$

где $S_{ч k i}$ – площадь части k -го района, обеспеченного связью i -м КА-связи;

S_k – общая площадь k -го района.

Весовой коэффициент Λ_i обеспеченности связью i -м КА-связи рассчитывается как сумма весовых коэффициентов частей всех обеспеченных связью районов:

$$\Lambda_i = \sum_{k=1}^K \Omega_{чр k i}.$$

Весовой коэффициент $\omega_{чр k i j}$ значимости обслуживания части k -го района при работе j -го СР по i -му КА-связи можно рассчитать по формуле

$$\omega_{чр k i j} = S_{ч k i j} \frac{\Omega_{чр k i}}{S_{ч k i}} = S_{ч k i j} \frac{\omega_k^a}{S_k}, \quad (1)$$

где $S_{ч k i j}$ – площадь обслуживаемой СР части k -го района при работе j -го СР по i -му КА-связи;

S_k – общая площадь k -го района.

Формула (1) также справедлива и для радиоконтроля каналов КА-связи несколькими СР, при этом площадь обслуживаемой части района совокупности СР увеличивается и равняется площади объединения частей районов, обслуживаемых отдельными СР.

Весовой коэффициент $w_{i j}$ значимости назначения j -го СР на i -й КА-связи рассчитывается как сумма весовых коэффициентов частей всех обслуживаемых районов:

$$w_{i j} = \sum_{k=1}^K \omega_{чр k i j}. \quad (2)$$

Физический смысл коэффициента $w_{i j}$ сводится к количеству каналов абонентов, радио-контроль которых можно осуществить при назначении j -го СР на i -й КА-связи. Совокупность коэффициентов $w_{i j}$ составляет матрицу W весовых коэффициентов назначений СР на КА-связи:

$$W = (w_{i j}), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}.$$

План применения СР представляется матрицей P ,

$$P = (p_{ij}), p_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если на } i\text{-й КА-связи назначен } j\text{-й РЭСР;} \\ 1, & \text{если на } i\text{-й КА-связи не назначен } j\text{-й РЭСР;} \end{cases} \quad i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$$

Тогда число каналов r , радиоконтроль которых осуществляется, рассчитывается через некоторую нетривиальную функцию f , аргументами которой являются план применения СР P и матрица весовых коэффициентов назначений W :

$$r = f(P, W).$$

Сложность представленной функции объясняется необходимостью учета в ней пересекающихся множеств контролируемых каналов абонентов при назначении на один КА-связи двух и более СР. При назначении на один КА-связи одного СР число каналов r , радиоконтроль которых осуществляется, рассчитывается по формуле

$$r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M w_{ij} p_{ij}.$$

Показатель эффективности радиоконтроля E рассчитывается по формуле

$$E = \frac{r}{\sum_i \Lambda_i}. \quad (3)$$

При ограниченном количестве станций радиоконтроля появляется необходимость планировать работу средств таким образом, чтобы эффективность радиоконтроля была максимальной. То есть возникает задача отыскания плана применения СР P^* , доставляющего максимум показателя эффективности проводимого радиоконтроля:

$$P^* = \arg \max_{P \in \Pi} E(P, W),$$

где Π – множество планов применения СР.

ВЫБОР МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ РАДИОКОНТРОЛЯ

При учете ограничения, что на один КА-связи может быть назначено только одно СР, сформулированная задача отыскания плана сводится к задаче о назначении, оптимальное решение которой успешно находится за полиномиальное время путем использования венгерского алгоритма. Данное ограничение вызвано только простотой решения поставленной задачи и может отрицательно влиять на общую эффективность мониторинга.

При отсутствии вышеприведенного ограничения представляется рациональным сформулировать данную задачу в терминах теории графов. Построим граф $G(V, E)$, где V – множество вершин графа, E – множество ребер. Совокупность всех возможных назначений радиоэлектронных средств на КА-связи представим в виде вершин графа $V = \{v_q\}$, $q = \overline{1, Q}$.

Каждая вершина представляется набором следующих параметров:

- номера СР, работающих по выбранному КА-связи;
- номер КА-связи;
- весовой коэффициент, определяющий значимость назначения СР на КА-связи.

Вершины p и q соединяются ребрами, если выполняется хотя бы одно из условий:

1. Номера радиоэлектронных средств, приведенные в вершине p , пересекаются с номерами средств, приведенными в вершине q .
2. Номера КА-связи в вершинах p и q совпадают.

Вершины, соединенные ребрами, находятся в конфликте. Разрешение этих конфликтов осуществляется путем выбора одной из вершин. Конфликтные ситуации могут выстраивать-

ся в цепочки, в этих случаях нетривиально отыскать то бесконфликтное множество вершин, сумма весов которых будет максимально-возможной.

Построим дополнение графа – граф G' , имеющий то же множество вершин, что и заданный граф G , но в котором две несовпадающие вершины смежны тогда и только тогда, когда они не смежны в G [6]. В найденном графе G' все конфликтные вершины не будут смежными. Если отыскать полный подграф в графе G' , то он будет отображать бесконфликтный план применения средств РЭС, эффективность этого плана будет равняться сумме весов всех вершин найденного полного подграфа. Полный подграф в теории графов называется кликой [6]. Задача отыскания оптимального плана применения радиоэлектронных средств мониторинга свелась к отысканию максимальной взвешенной клики.

Задача поиска максимальной взвешенной клики в неориентированном графе относится к NP-трудным задачам. Алгоритмы поиска оптимальных решений данной задачи имеют экспоненциальную временную сложность, например алгоритм Робсона, который на сегодняшний день считается самым быстродействующим, имеет временную сложность $O(2^{0.276n})$, где n – количество вершин в графе. Мощность графа G при решении задачи поиска оптимального плана задействования средств мониторинга составляет порядка 3000 вершин. Алгоритм Робсона для данного графа на современном компьютере, например с частотой процессора 5 ГГц, 8 ядрах и 16 потоках, будет решаться около 50 лет, что недопустимо долго.

В настоящее время проводится множество исследований по совершенствованию алгоритмов поиска максимальной взвешенной клики. Одним из наиболее проработанных, по мнению авторов, является алгоритм Станислава Бусыгина QUALEX-MS (QUick ALmost EXact Motzkin–Straus based), представленный в работе [7]. Временная сложность предлагаемого алгоритма является полиномиальной $O(n^3)$, где n – количество вершин в графе, что гарантирует длительность решения задачи поиска максимального взвешенного клика для графа, состоящего из 3000 вершин, менее чем за 15 мин.

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ РАДИОКОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

На основе выбранных методов поиска планов применения СР разработана методика планирования применения РЭС радиоконтроля КА-связи, структурно-логическая схема которой представлена на рис. 3.

Методика включает в себя 12 основных блоков.

В *первом блоке* задаются исходные данные о районах расположения абонентов, орбитальной группировке КА-связи и станциях спутникового радиоконтроля.

Во *втором блоке* производится расчет пространственно-энергетических характеристик взаимодействия абонентов и КА-связи. КА-связи считается в зоне видимости, если угол места на данный КА больше 7° . Энергетическая доступность КА проверяется путем расчета мощности сигнала в приемной антенне аппаратуры абонента $P_{\text{вх}}^a$ по формуле [6]

$$P_{\text{вх}}^a = \frac{P^{\text{КА}} G^{\text{КА}} G^p \lambda_n^2}{(4\pi D_a)^2},$$

- где $P^{\text{КА}}$ – мощность, излучаемая передающей антенной КА-связи;
 $G^{\text{КА}}$ – коэффициент усиления передающей антенны КА-связи;
 G^p – коэффициент усиления приемной антенны абонента;
 λ_n – длина несущей радиоволны, используемой для передачи сообщения;
 D_a – расстояние между КА-связью и абонентом.

Если мощность сигнала в приемной антенне аппаратуры абонента $P_{\text{вх}}$ больше чувствительности приемника $P_{\text{вх}}^a$, то считается, что аппаратура абонента может принимать сигнал от КА-связи.

В *третьем блоке* осуществляется расчет пространственно-энергетических характеристик взаимодействия станций спутникового радиоконтроля и КА-связи, при обеспечении последними связи с заданными абонентами. Пространственная доступность КА-связи для СР проверяется путем расчета величины угла места КА-связи, который должен быть больше 7° .

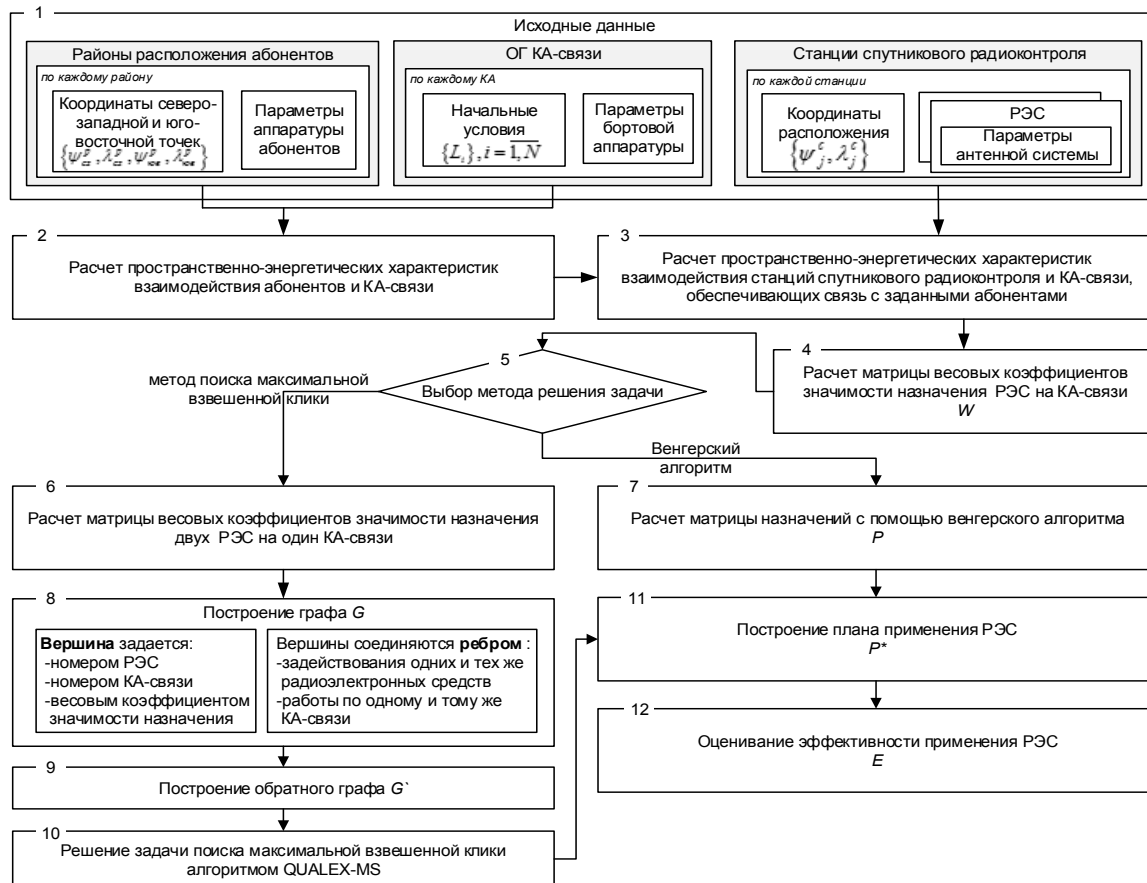


Рис. 3. Структурно-логическая схема методики планирования применения СР функционирования КА-связи

Энергетическая доступность канала между КА-связи и абонентом для радиоэлектронного средства оценивается мощностью энергии, приходящей на приемную антенну СР $P_{\text{вх}}^p$. Для расчета $P_{\text{вх}}^p$ используется формула [7]

$$P_{\text{вх}}^p = \frac{P^{\text{КА}} G^{\text{КА-p}} G^p \lambda_n^2}{(4\pi D_{\text{р-КА}})^2},$$

где $P^{\text{КА}}$ – мощность, излучаемая передающей антенной КА-связи;
 $G^{\text{КА-p}}$ – коэффициент усиления передающей антенны КА-связи в направлении СР;
 G^p – коэффициент усиления приемной антенны СР;
 λ_n – длина несущей радиоволны, используемой для передачи сообщения;
 $D_{\text{р-КА}}$ – расстояние между КА-связи и СР.

Главный лепесток диаграммы направленности удобно представить классической функцией типа $\sin(x)/x$, что позволяет, задавшись шириной диаграммы направленности, рассчитать коэффициент усиления передающей антенны в направлении СР.

В *четвертом блоке* производится расчет весовых коэффициентов значимости назначения СР на КА-связи по формулам (1) и (2).

В *пятом блоке* осуществляется выбор метода решения задачи поиска плана применения СР. Выбор метода решения задачи не является однозначным в связи с тем, что у каждого предлагаемого метода есть свои очевидные плюсы и минусы. Так, венгерский алгоритм не позволяет планировать работу двух и более средств на один КА, но при этом он находит оптимальное решение. Метод поиска максимальной взвешенной клики лишен недостатков венгерского алгоритма, но при этом решения, получаемые в результате его применения, являются рациональными и в некоторых случаях могут быть хуже решений, полученных венгерским алгоритмом.

В *шестом блоке* производится расчет матрицы весовых коэффициентов значимости назначения двух СР на один КА-связи по формулам (1) и (2).

В *седьмом блоке* осуществляется расчет матрицы назначения с помощью венгерского алгоритма.

В *восьмом блоке* осуществляется построение графа G по правилам, описанным ранее.

В *девятом блоке* рассчитывается обратный граф G' графа G путем замены всех единиц на нули, а всех нулей – на единицы в матрице смежности графа G , кроме главной диагонали.

В *десятом блоке* осуществляется поиск максимально взвешенной клики с использованием алгоритма QUALEX-MS.

В *одиннадцатом блоке* методики производится составление рационального плана применения СР путем перевода полученных решений к виду соответствующих назначений радиоэлектронных средств на КА-связи.

В *двенадцатом блоке* производится расчет показателя эффективности применения СР по формуле (6).

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ

Для реализации методики планирования применения СР функционирования КА-связи был разработан комплекс программ, позволяющих решать задачу построения плана с использованием двух алгоритмов: венгерского алгоритма и алгоритма QUALEX-MS.

Работоспособность программного комплекса проверена на тестовом примере. В качестве системы СР рассматривается перспективная система спутникового радиоконтроля России [8], имеющая в своем составе семь спутниковых станций радиоконтроля (ССРК), представленных в табл. 1.

Таблица 1

Состав системы спутникового радиоконтроля России

Название ССРК	Количество антенных систем	Координаты широта/долгота	Зона видимости ГСО
«Новосибирск»	16	55° с.ш./83° в.д.	22° в.д. до 145° в.д.
«Смоленск»	9	55° с.ш./32° в.д.	30° з.д. до 94° в.д.
«Воронеж»	1	52° с.ш./39° в.д.	25° з.д. до 103° в.д.
«Белгород»	7	50° с.ш./36° в.д.	29° з.д. до 101° в.д.
«Хабаровск»	3	48° с.ш./135° в.д.	68° в.д. до 159° з.д.
«Славянка»	6	42° с.ш./131° в.д.	62° в.д. до 160° з.д.
«Крым»	12	45° с.ш./34° в.д.	34° з.д. до 102° в.д.

Как объекты, подлежащие радиоконтролю, рассматриваются КА-связи Российской Федерации [9], параметры которых приведены в табл. 2. В качестве исходных данных принято нахождение 60000 абонентских станций, равномерно расположенных на всей территории Российской Федерации.

В результате моделирования с использованием венгерского алгоритма и метода отыскания максимальной взвешенной клики получены планы применения радиоэлектронных средств, представленные в графическом виде на рис. 4 и 5 соответственно. Кроме того, установлено, что эффективность применения СР зависит от выбранного метода поиска плана их применения. Так, показатель эффективности решения задачи по венгерскому методу составляет 0,66, а по методу отыскания максимальной взвешенной клики – 0,72. При этом количество назначений в первом случае равно 15, а во втором – 21. Таким образом, сведение задачи планирования применения радиоэлектронных средств к задаче поиска максимальной взвешенной клики позволило более полно планировать использование ресурса системы спутникового радиоконтроля России и повысить эффективность решаемой задачи.

Таблица 2

КА-связи Российской Федерации

№	Название КА	Точка стояния	В зоне видимости ССРК
1	Express AMU1	64 ⁰ в.д.	+
2	Express-A1R	53 ⁰ з.д.	-
3	Express-AM2	98 ⁰ з.д.	-
4	Express-AM3	60 ⁰ в.д.	+
5	Express-AM33	55 ⁰ з.д.	-
6	Express-AM44	180 ⁰ в.д.	+
7	Express-AM5	84 ⁰ в.д.	+
8	Express-AM6	25 ⁰ в.д.	+
9	Express-AM7	82 ⁰ в.д.	+
10	Express-AM8	74 ⁰ в.д.	+
11	Express-AT1	83 ⁰ в.д.	+
12	Express-AT2	94 ⁰ в.д.	+
13	Luch 5A	1 ⁰ з.д.	+
14	Luch 5B	43 ⁰ в.д.	+
15	Luch 5V	45 ⁰ в.д.	+
16	Yamal-202	180 ⁰ в.д.	+
17	Yamal-300K	166 ⁰ в.д.	+
18	Yamal-401	45 ⁰ з.д.	-
19	Yamal-402	69 ⁰ в.д.	+

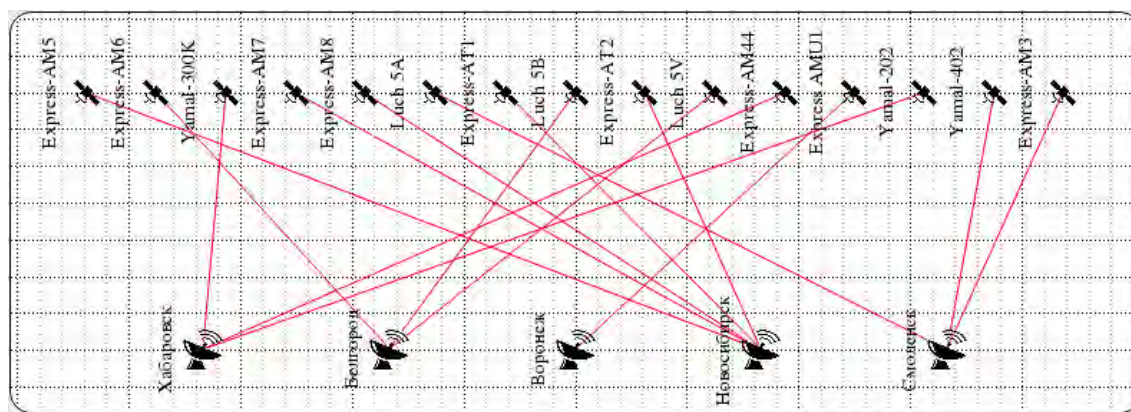


Рис. 4. Графическое представление плана применения ССРК по венгерскому алгоритму

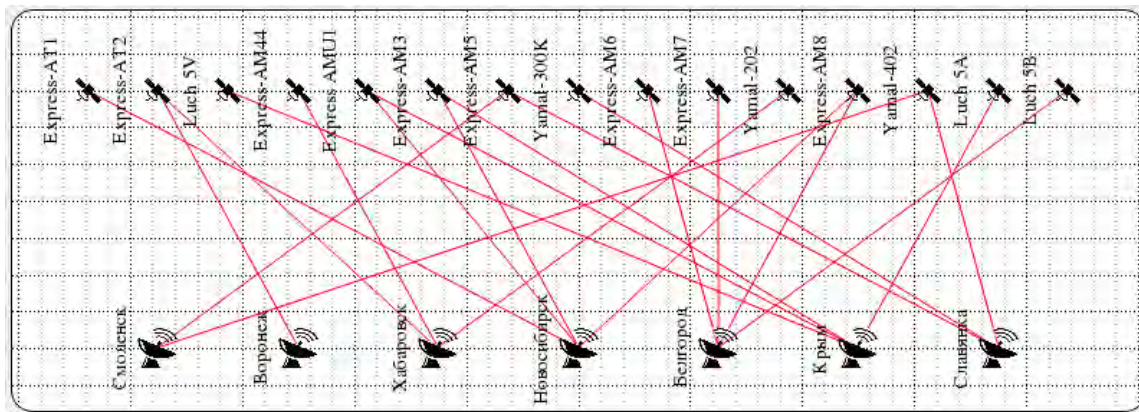


Рис. 5. Графическое представление плана применения ССРК по методу отыскания максимальной взвешенной клики

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты с различным составом системы спутникового радиоконтроля позволили выявить следующие закономерности:

- венгерский метод отыскивает более эффективный план применения РЭС, чем метод поиска максимальной взвешенной клики, если число КА-связи, мониторинг каналов которых необходимо осуществить, значительно больше суммарного числа антенн СР (в 1,5–2 раза);
- метод поиска максимальной взвешенной клики отыскивает более эффективный план применения СР, чем венгерский метод, если число КА-связи значительно меньше суммарного числа антенн СР (в 1,5–2 раза);
- при сравнительно близком числе КА-связи и суммарном числе антенн СР оба метода находят одинаковые по эффективности планы применения СР.

Предложенная методика планирования применения СР функционирования КА-связи может быть использована в автоматизированной системе спутникового радиоконтроля для более эффективного планирования применения станций спутникового радиоконтроля.

Разработанная методика позволяет корректно сформулировать и решить ряд актуальных научно-практических задач анализа и синтеза систем спутникового радиоконтроля:

- 1) оценивания эффективности функционирования ССРК в различных условиях обстановки;
- 2) оценивания целевых возможностей перспективной ССРК;
- 3) планирования задействования средств как отдельных СР, так и ССРК в целом для эффективного контроля орбитально-частотного ресурса;
- 4) обоснования направлений развития и совершенствования ССРК и т. п.

Список используемых источников

1. Создание системы контроля за использованием орбитально-частотного ресурса [Электронный ресурс] // Решение Государственной комиссии по радиочастотам №15/2 от 24 декабря 2001 года. – URL: http://www.nra.ru/bull/bull10/bull10_2.htm (дата обращения: 10.11.2018).
2. Концепция развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года: утверждена решением ГКРЧ от 4 июля 2017 г. № 17-42-06. – URL: <http://www.minsvyaz.ru/uploaded/files/kontseptsiya-radiokontrolya-k-17-42-06.pdf> (дата обращения: 10.11.2018).

3. О радиочастотной службе: Постановление Правительства РФ от 14.05.2014 №434. – URL: <http://www.base.garant.ru/70654008/> (дата обращения: 10.11.2018).
4. Харари Ф. Теория графов. – 2-е изд. – М.: УРСС, 2003. – 295 с.
5. Кизима С.В. Спутниковый радиомониторинг и поиск помех спутниковых радиослужб // Региональный семинар международного союза электросвязи «Перспективные космические технологии». – Ереван, 2014.
6. Busygin S. An new trust region technique for the maximum weight clique problem // Elsevier Science [сайт, 2003]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166218X06000497> (дата обращения: 10.11.2018).
7. Спутниковые системы связи.: учеб. пособие для вузов / под ред. А.М. Сомова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2012. – 244 с.
8. Иваненко В.В. Возможности и перспективы развития спутникового радиоконтроля // XVII Всероссийский форум «Нормативно-правовое регулирование использования радиочастотного спектра и информационно-коммуникационных сетей». – Сочи, 2017.
9. USC Satellite Database // Union of Concerned Scientists [сайт, 2018]. – URL: <https://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons> (дата обращения: 10.11.2018).

С.А. Власов,
кандидат техн. наук, доцент;
И.Ю. Кубасов,
кандидат техн. наук

РАСЧЕТ СТРУКТУР ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГЛОБАЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ОБЗОРА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, ОСНАЩЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Рассматривается новый алгоритм, и приводятся результаты расчета структур орбитальных группировок космических аппаратов, оснащенных радиолокационными комплексами кругового обзора.

Ключевые слова: космический аппарат, орбитальная группировка, структура орбитальной группировки, глобальный непрерывный обзор, мгновенная зона обзора, угол полураствора бортовой аппаратуры.

ВВЕДЕНИЕ

Использование радиолокатора на борту космического аппарата (КА) позволяет круглосуточно и независимо от погодных условий вести радиолокационную съемку земной поверхности в интересах гражданских и военных потребителей. В связи с этим одним из перспективных направлений на сегодняшний день является создание орбитальных группировок (ОГ) КА [1], оснащенных радиолокационными комплексами, которые позволяли бы решать задачу глобального непрерывного обзора поверхности Земли. Под глобальным непрерывным обзором поверхности Земли понимается такой вид наблюдения, когда любая точка поверхности Земли в любой момент времени попадает в зону обзора хотя бы одного из КА ОГ [2].

В практике расчета структур ОГ КА используется понятие мгновенной зоны обзора, под которой понимают множество точек поверхности Земли, осматриваемых бортовой аппаратурой наблюдения КА в данный момент [3]. Форма мгновенной зоны обзора влияет на характеристики обзора ОГ КА. В большинстве случаев зона обзора на поверхности шарообразной Земли представляет собой сферический сегмент и получается путем пересечения образующей поверхности кругового конуса с углом полураствора, равным углу обзора бортовой аппаратуры наблюдения КА, с ее поверхностью. При этом ось кругового конуса пересекает подспутниковую точку КА. Такой зоной обзора обладают, например, КА, имеющие на своем борту радиотехнический комплекс.

При использовании радиолокационных комплексов бортовая аппаратура КА обеспечивает односторонний или двусторонний боковой обзор поверхности Земли, а часть поверхности в окрестности трассы полета остается непросмотренной, что связано с особенностями функционирования таких комплексов. Мгновенная зона обзора при этом имеет вид полосы, расположенной справа и слева от трассы полета. Поэтому, чтобы обеспечить просмотр в окрестности трассы полета требуется дополнительные пролеты КА.

В работе [4] показано, как влияет форма зоны обзора на эффективность обзора поверхности Земли КА радиолокационного наблюдения, а также показано, что в целях повышения эффективности использования ОГ КА радиолокационного обзора целесообразно рассмотреть возможность создания бортового радиолокационного комплекса кругового обзора. При круговом обзоре мгновенная зона обзора радиолокационного комплекса будет отличаться по форме от сферического сегмента, а алгоритм расчета структур ОГ КА – от алгоритмов расчета структур, представленных в [2, 3, 5, 6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При использовании радиолокационных комплексов кругового обзора бортовая аппаратура будет обеспечивать обзор части поверхности Земли, лежащей между поверхностями двух круговых конусов с заданными углами полураствора γ_1, γ_2 . В этом случае на поверхности шарообразной Земли радиусом R образуется зона обзора, расположенная между двумя малыми кругами, размеры которых характеризуются геоцентрическими углами $\varphi_{3_1}, \varphi_{3_2}$ (рис.1).

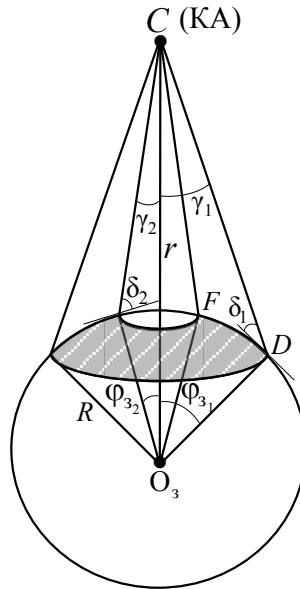


Рис.1. Зона обзора

Геоцентрические углы зоны обзора $\varphi_{3_1}, \varphi_{3_2}$ зависят от радиуса орбиты КА (r) и углов полураствора γ_1 и γ_2 . Из треугольников CFO_3 и CDO_3 по теореме синусов получаем:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{3_1} &= \arcsin\left(\frac{r}{R} \sin \gamma_1\right) - \gamma_1, \\ \varphi_{3_2} &= \arcsin\left(\frac{r}{R} \sin \gamma_2\right) - \gamma_2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Если условия обзора задаются не углами полураствора бортовой аппаратуры, а минимальными углами возвышения над горизонтом точки наблюдения δ_1, δ_2 (рис.1), то

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{3_1} &= \arccos\left(\frac{R}{r} \cos \delta_1\right) - \delta_1, \\ \varphi_{3_2} &= \arccos\left(\frac{R}{r} \cos \delta_2\right) - \delta_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для решения задачи расчета структуры ОГ КА глобального непрерывного обзора с радиолокационным комплексом кругового обзора на борту можно использовать способ построения, основанный на применении кинематически правильных систем [2].

Структура кинематически правильных систем на круговых орбитах задается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
\Omega_j &= \Omega_1 + (j-1)2\pi k / N, \\
u_j &= u_1 + (j-1)2\pi l / N, \\
i_j &= i, \\
r_j &= r \\
j &= 1, 2, \dots, N,
\end{aligned} \tag{3}$$

где N – число КА в ОГ;
 Ω_j – прямое восхождение восходящего узла j -того КА;
 u_j – аргумент широты j -того КА;
 i – наклонение орбит КА;
 r – радиус круговых орбит КА ($r = \text{const}$);
 k – целое число, задает расположение восходящих узлов орбит;
 l – целое число, определяет расположение КА в плоскости орбиты.

Для получения неповторяющихся структур ОГ КА, определяемых выражениями (3), достаточно рассмотреть лишь те из чисел $k = 1, 2, \dots, \left[\frac{N}{2} \right]$, для которых отношение $\frac{N}{k}$ есть целое число, а числа $l = 1, 2, \dots, N$.

При принятом выборе числа k отношение $\left[\frac{N}{k} \right]$ будет определять число плоскостей в ОГ, а k – число КА в одной плоскости.

При заданной структуре ОГ КА для обеспечения непрерывности и глобальности обзора необходимо определить величину минимальной мгновенной зоны обзора.

Величина минимальной мгновенной зоны обзора, необходимой для обеспечения глобального непрерывного обзора поверхности Земли при отсутствии ограничения по углу γ_2 , определяется из следующего условия:

$$\varphi'_{z_1} = \max_{\psi, \lambda, u_1} \min_{j=1 \dots N} \varphi_j(\psi, \lambda, u_1). \tag{4}$$

Здесь φ_j – угловое расстояние от подспутниковой точки j -того КА до точки на поверхности Земли с геоцентрической широтой $\psi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$ и долготой $\lambda \in [0, 2\pi]$;

u_1 – аргумент широты первого КА, $u_1 \in [0, \delta u]$, где $\delta u = \frac{2\pi}{4N} l'$ – угол по аргументу широты КА, через который повторяется структура системы, где l' – наибольший общий делитель чисел N, l ;

j – номер КА, $j = 1, 2, \dots, N$.

Угол φ_j в формуле (4) определяется из выражения

$$\cos \varphi_j = \sin \psi_j \sin \psi + \cos \psi_j \cos \psi \cos(\lambda_j - \lambda) \tag{5}$$

с использованием формул:

$$\begin{aligned}
\sin \psi_j &= \sin u_j \sin i, \\
\cos \psi_j \cos \lambda_j &= \cos \Omega_j \cos u_j - \sin \Omega_j \sin u_j \cos i, \\
\cos \psi_j \sin \lambda_j &= \sin \Omega_j \cos u_j + \cos \Omega_j \sin u_j \cos i.
\end{aligned} \tag{6}$$

Углы u_j и Ω_j в выражении (6) определяются из формулы (3) по аргументу широты u_1 и прямому восхождению восходящего узла Ω_1 первого КА в ОГ.

При наличии ограничения по углу γ_2 необходимо, чтобы внутренние пространства мгновенных зон обзора, ограниченных внутренним малым кругом (см. рис.1), всех КА покрывались мгновенными зонами обзора других КА из ОГ.

Для этого величина минимальной зоны обзора должна определяться из следующего условия:

$$\varphi''_{3_1} = \max_{u_1} \max_{n=1 \dots N} \min_{\substack{j=1 \dots N \\ j \neq n}} \varphi_{j,n}(u_1), \tag{7}$$

где

$$\varphi_{j,n} = \arccos(\sin \psi_j \sin \psi_n + \cos \psi_j \cos \psi_n \cos(\lambda_j - \lambda_n)) + \varphi_{3_2}. \tag{8}$$

В результате минимальная зона обзора φ_{3_1} , необходимая для обеспечения непрерывного обслуживания всей поверхности Земли при наличии ограничения по углу γ_2 , определяется из следующего условия:

$$\varphi_{3_1} = \max\{\varphi'_{3_1}, \varphi''_{3_1}\}. \tag{9}$$

Задача расчета оптимальной структуры ОГ КА, которая обеспечивала бы глобальный непрерывный обзор поверхности Земли при минимальном числе КА в ОГ, выглядит следующим образом.

Пусть заданы наклонения плоскостей орбит i и величины $\varphi_{3_1}^{\text{зад}}$, $\varphi_{3_2}^{\text{зад}}$, определяющие размеры мгновенной зоны обзора КА. Вместо величин $\varphi_{3_1}^{\text{зад}}$, $\varphi_{3_2}^{\text{зад}}$ в качестве исходных данных могут задаваться радиус орбиты r , углы полураствора бортовой аппаратуры γ_1 , γ_2 или минимальные углы возвышения над горизонтом точки наблюдения δ_1 , δ_2 ввиду их связи между собой [выражения (1) и (2)].

Требуется рассчитать такую структуру ОГ КА, которая обеспечивала бы глобальный непрерывный обзор поверхности Земли при минимальном числе КА в ОГ – N .

Следовательно, необходимо определить числа k , l , причем такие, чтобы

$$N = \min_{k,l} N(k,l) \tag{10}$$

при выполнении условий обеспечения глобального непрерывного обзора:

$$\varphi'_{3_1} = \max_{\psi, \lambda, u_1} \min_{j=1 \dots N} \varphi_j(\psi, \lambda, u_1) \leq \varphi_{3_1}^{\text{зад}}, \tag{11}$$

$$\varphi''_{3_1} = \max_{u_1} \max_{n=1 \dots N} \min_{\substack{j=1 \dots N \\ j \neq n}} \varphi_{j,n}(u_1) \leq \varphi_{3_1}^{\text{зад}}. \tag{12}$$

Условия (11), (12) требуют решения задачи анализа для всех возможных структур ОГ КА, пока не будет выполнено условие (10). При решении задачи расчета структуры методом сатисфакции, когда перебор N начинается с некоторого числа КА в ОГ, меньшего, чем ожидаемое минимальное число КА в системе, от условий (11) и (12) можно перейти к условиям

$$\min_{j=1\dots N} \varphi_j(\psi, \lambda, u_1) \leq \varphi_{3_1}^{\text{зад}} \quad (13)$$

при всех значениях $\psi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, $\lambda \in [0, 2\pi]$, $u_1 \in [0, \delta u]$; при этом

$$\min_{\substack{j=1\dots N \\ j \neq n}} \varphi_{j,n}(u_1) \leq \varphi_{3_1}^{\text{зад}} \quad (14)$$

при всех значениях $j = 1, 2, \dots, N$, $n = 1, 2, \dots, N$, $u_1 \in [0, \delta u]$, где

$$\begin{aligned} \varphi_j &= \arccos(\sin \psi_j \sin \psi + \cos \psi_j \cos \psi \cos(\lambda_j - \lambda)), \\ \varphi_{j,n} &= \arccos(\sin \psi_j \sin \psi_n + \cos \psi_j \cos \psi_n \cos(\lambda_j - \lambda_n)) + \varphi_{3_2}^{\text{зад}}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что отбраковка структур ОГ КА будет происходить в случае, когда не выполнится одно из условий (13) или (14) без полного решения задачи анализа и проверки условий (11) и (12).

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача расчета структуры ОГ решается методом сатисфакции.

1. Организуется перебор чисел N , начиная с некоторого числа КА в ОГ – N_0 , меньшего, чем ожидаемое минимальное число КА в системе, и чисел k, l :

$$\begin{aligned} N &= N_0, N_0 + 1, N_0 + 2, \dots; \\ k &= 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, \text{ для которых отношение } \frac{N}{k} \text{ есть целое число;} \\ l &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

2. С использованием выражений (3) для каждого набора чисел N, k, l рассчитывается структура ОГ КА.

3. Для заданной структуры ОГ КА проверяется выполнение условий (13) для всех значений $\psi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, $\lambda \in [0, 2\pi]$, $u_1 \in [0, \delta u]$ и условия (14) для всех значений $j = 1, 2, \dots, N$, $n = 1, 2, \dots, N$, $u_1 \in [0, \delta u]$.

4. Если хотя бы одно из условий, (13) или (14), не выполняется, то осуществляется переход к следующей структуре (см. п.1).

Первая из структур, для которой условия (13) и (14) выполняются для всех значений ψ, λ, u_1, j, n , будет оптимальной структурой, обеспечивающей глобальный непрерывный обзор поверхности Земли при заданных наклонении плоскостей орбит i и величинах $\varphi_{3_1}^{\text{зад}}$ и $\varphi_{3_2}^{\text{зад}}$.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ГЛОБАЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ОБЗОРА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

В табл. 1–4 приведены оптимальные структуры кинематически правильных ОГ КА глобального непрерывного радиолокационного обзора поверхности Земли для угла зоны обзора $\varphi_{3_1} = 72^\circ$ при варьировании $\varphi_{3_2} = 2^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 10^\circ$ и наклонений, обеспечивающих глобальность обзора.

Значения углов обзора φ_{3_1} и φ_{3_2} могут быть получены при разных высотах орбит и характеристиках бортовой аппаратуры КА. Например, для геостационарной орбиты заданные значения углов соответствуют значениям углов полураствора бортовой аппаратуры $\gamma_1 = 8.7^\circ$ для $\varphi_{3_1} = 72^\circ$ и $\gamma_2 = 0.36^\circ, 0.9^\circ, 1.25^\circ, 1.78^\circ$ соответственно для углов $\varphi_{3_2} = 2^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 10^\circ$.

Таблица 1

Структуры ОГ КА радиолокационного обзора для $\varphi_{3_1} = 72^\circ$, $\varphi_{3_2} = 2^\circ$

i [град]	N	k	l
30–31	7	1	4, 5
32–35	6	1	1
36–40	7	1	4, 5
41–46	7	1	5
47–66	7	1	2, 5, 6
67–68	8	1	5
		4	1
69–76	8	1	5
69–76	8	1	5
77–90	9	1	3
		3	1

Таблица 2

Структуры ОГ КА радиолокационного обзора для $\varphi_{3_1} = 72^\circ$, $\varphi_{3_2} = 5^\circ$

i [град]	N	k	l
30–31	7	1	4, 5
32–33	6	1	1
34–36	7	1	4, 5
37–41	7	1	5
42–56	8	1	2, 5, 6
57–61	8	1	5
62–68	8	1	5
		4	1
69–76	8	1	5
77–90	9	1	3
		3	1

Таблица 3

Структуры ОГ КА радиолокационного обзора для $\varphi_{31} = 72^\circ$, $\varphi_{32} = 7^\circ$

i [град]	N	k	l
30–31	7	1	4, 5
32	6	1	1
33	7	1	4, 5
34–38	7	1	5
39–42	8	1	2, 6
43–53	8	1	2, 5, 6
54–63	8	1	5
64–68	8	1	5
		4	1
69–76	8	1	5
77–79	9	1	6
		3	1
80–90	9	1	6
		3	2

Таблица 4

Структуры ОГ КА радиолокационного обзора для $\varphi_{31} = 72^\circ$, $\varphi_{32} = 10^\circ$

i [град]	N	k	l
30–33	7	1	5
34–45	8	1	2, 6
46–48	8	1	2, 5, 6
49–65	8	1	5
66–68	8	1	5
		4	1
69–76	8	1	5
77–90	9	1	6

Анализ табл. 1–4 показывает, что увеличение угла φ_{32} (вследствие этого уменьшается площадь мгновенной зоны обзора) приводит, в ряде случаев, к увеличению числа КА в ОГ на один для одних и тех же наклонений.

В табл. 5 приведены оптимальные структуры кинематически правильных ОГ КА глобального непрерывного обзора поверхности Земли для угла зоны обзора $\varphi_{31} = 72^\circ$ без ограничения по углу φ_{32} [без учета условия (13)] для различных наклонений. Такая зона обзора представляет собой сферический сегмент, ее имеет, например, бортовая аппаратура наблюдения КА радиотехнического обзора. Из приведенных результатов (табл. 1–5) следует, что наличие ограничения по углу φ_{32} не приводит к существенному увеличению числа КА в ОГ. Минимальное число КА в ОГ без ограничения по углу φ_{32} составляет пять КА, а при наличии ограничений $\varphi_{32} \in [2^\circ, 10^\circ]$ минимальное число КА изменяется от шести до семи КА.

Таблица 5

Структуры ОГ КА для $\varphi_{z_1} = 72^\circ$ без ограничения по углу φ_{z_2}

i [град]	N	k	l
30	7	1	1, 2, 4, 5
31	7	1	1
32–34	6	1	1
35–37	6	1	1
		3	1
38–49	5	1	1
50–61	6	1	4
		3	2
62–82	6	1	4
83–90	7	1	2, 5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан алгоритм расчета структуры ОГ КА глобального непрерывного обзора поверхности Земли при использовании радиолокационных комплексов на борту с круговой зоной обзора. Приведены примеры расчета структур ОГ КА для различных значений зон обзора и наклонений. Число КА в ОГ зависит от высоты орбит КА, их наклонения и ограничений на углы зоны обзора.

Решение задачи поиска минимальной структуры ОГ КА для глобального непрерывного обзора в диапазоне допустимых наклонений орбит для ОГ КА с круговой зоной обзора при наличии ограничений $\varphi_{z_2} \in [2^\circ, 10^\circ]$ и ОГ КА с зоной обзора в виде сферического сегмента показало, что рост числа КА в ОГ составляет один, два КА.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 27 с.
2. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, С.А. Богачев и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 302 с.
3. Можаяев Г.В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем: Теоретико-групповой подход. – М.: Машиностроение, 1989. – 303 с.
4. Варфоломеев В.С. Влияние формы обзора на эффективность обзора Земли космическим аппаратом радиолокационного наблюдения // Вестник СибГАУ. – 2017. – Т.18, №1. – С. 118–122.
5. Власов С.А., Кубасов И.Ю. Расчет баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов глобального непрерывного обслуживания околоземного космического пространства // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Вып. 644, т. 2. – С. 141–146.
6. Расчет систем космических аппаратов на эллиптических орбитах для непрерывного обзора широтного пояса Земли с помощью радиолокационной аппаратуры / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, А.В. Кульвиц, А.Ю. Хасанов // Космонавтика и ракетостроение. – К.: ЦНИИмаш, 2018. – Вып. 5 (104). – С. 63–71.

А.О. Иванов,
кандидат техн. наук;
Е.В. Котяшов,
кандидат техн. наук;
А.В. Чарушников,
доктор военных наук;
В.А. Чернявский,
кандидат техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ПАРИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ С ОБЪЕКТАМИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В публикации отмечено, что наращивание орбитальной группировки на геостационарной орбите повышает опасность столкновения действующих космических аппаратов с объектами космического мусора. Как способ парирования возможных угроз рассмотрено защитное маневрирование. Проанализированы различные варианты маневров космических аппаратов и проведено их математическое моделирование.

Ключевые слова: космический мусор, геостационарная орбита, геостационарный космический аппарат, транспортная операция, план транспортной операции.

ВВЕДЕНИЕ

Наращивание орбитальной группировки на геостационарной орбите повышает опасность столкновения космических аппаратов (КА) с КА, которые завершили свое активное существование и по каким-либо причинам не были переведены на орбиту захоронения, а также с отработавшими элементами разгонных блоков и другими техногенными телами, появившимися в результате эксплуатации ракетно-космической техники.

Наиболее предпочтительным из всех рассматриваемых способов защиты КА от столкновения в космическом пространстве является защитное маневрирование. Главное его преимущество состоит в относительной простоте реализации, так как не предусматривает внесение в конструктив КА дополнительных технических устройств. Особенностью выполнения защитного маневрирования геостационарного КА является необходимость исключить его уход за границы точки стояния либо минимизировать время нахождения КА вне ее пределов. Поэтому требуется провести анализ различных вариантов защитного маневрирования для обоснования наиболее предпочтительного с точки зрения затрат рабочего тела и времени проведения маневра.

ОПИСАНИЕ ОБЩЕЙ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

В процессе полета на геостационарный космический аппарат действует, помимо центральной составляющей гравитационного поля Земли, целый ряд сил, к которым в первую очередь относятся [1]:

- составляющие гравитационного притяжения Земли, обусловленные наличием полярного сжатия и аномалий геопотенциала;
- гравитационное притяжение Солнца и Луны;
- прямое световое давление.

Влияние вышеназванных возмущений обуславливает невозможность идеального (неподвижного относительно Земли) удержания КА в точке стояния на геостационарной орбите (ГСО). На практике удастся реализовать только квазистационарную орбиту, которая позволяет находиться КА в окрестности точки стояния с учетом решаемых им задач и международных ограничений.

Удержание КА в окрестности точки стояния необходимо для качественного выполнения целевых задач. Поскольку время активного существования КА на ГСО может достигать 15 лет, то расход рабочего тела является одним из важнейших показателей, требующих оптимизации.

Задачу обеспечения требуемых параметров геостационарной орбиты можно трактовать как классическую в теории управления, в которой рассматривается система с обратной связью. Величины отклонений параметров движения КА от идеальных обуславливаются следующими параметрами:

- скоростью дрейфа относительно точки стояния;
- периодичностью совершения корректирующих маневров и их точностью;
- ошибками навигации (определения текущих значений широты и долготы).

Некорректируемое движение КА относительно точки стояния имеет сложный характер. В долготном направлении КА смещается относительно точки стояния из-за гармонических колебаний периода обращения, отличающегося от длительности звездных суток, а также из-за постоянно возрастающего смещения в сторону ближайшей точки устойчивого равновесия с ускорением, зависящим от первоначальной удаленности от нее. В широтном направлении движение КА представляет собой гармонические колебания относительно плоскости экватора с суточным периодом и переменной амплитудой, определяемой текущим значением наклона плоскости орбиты. При этом изменение самого наклона зависит от ориентации плоскости орбиты относительно Солнца, а также ряда периодических составляющих.

Отсутствие коррекций неизбежно приведет к выходу КА за пределы заданной окрестности точки стояния и, соответственно, срыву выполнения целевых задач. При этом задача расчета управления КА является достаточно сложной, так как необходимо определить время начала коррекции, длительность работы двигательной установки и направление вектора тяги. Следует отметить, что приведение параметров движения КА к требуемым не всегда позволяет ему оставаться в окрестности заданной точки стояния длительное время, а расход рабочего тела при этом будет большим.

В настоящее время различают два типа маневров поддержания параметров квазистационарной орбиты [2]:

- 1) маневры коррекции дрейфа долготы и эксцентриситета (маневры «Восток – Запад»), выполняемые для компенсации влияния внутрисекторных компонентов возмущений;
- 2) маневры коррекции наклона (маневры «Север – Юг»), выполняемые для компенсации влияния внепланетных компонентов возмущений.

Периодичность проведения указанных маневров в первую очередь определяется необходимостью компенсации накопившегося отклонения КА от точки стояния и возможностями двигательной установки. Как правило, для снижения затрат топлива и упрощения расчетов параметры маневров выбирают таким образом, чтобы компенсировать действия только вековых (непрерывно возрастающих) отклонений. Однако и в этом случае для формирования управления требуется анализ большого количества апостериорной информации о характере движения КА.

Таким образом, удержание КА в окрестности заданной точки стояния на геостационарной орбите требует совершения регулярных корректирующих маневров. Целью управления в данном случае является регулярная компенсация влияния вековых и усредненных периодических составляющих возмущений параметров орбиты.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ МАНЕВРОВ УКЛОНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В настоящее время всё больше внимания уделяется разработке систем обнаружения и идентификации искусственных и естественных воздействий на особо важные КА. Такие средства предполагается размещать как на самих КА, так и на так называемых КА охранения, располагающихся в окрестности охраняемых наиболее важных КА для идентификации и парирования возможных угроз столкновения с объектами космического мусора (ОКМ). Однако размещение подобных средств на самих КА может значительно утяжелить конструкцию и ограничить их возможности при выполнении задач по предназначению. Поэтому в случае, если КА охранения не может нейтрализовать угрозу, то основным из способов защиты является выполнение маневра уклонения для достижения относительной дистанции, на которой нанесение ему вреда менее вероятно.

Возможности КА по совершению экстренного маневра уклонения в основном определяются характеристиками его двигательной установки.

Было проведено моделирование выполнения КА на ГСО трех типов защитных маневров для предотвращения столкновения с ОКМ:

- 1) маневр с управляющим ускорением, направленным по трансверсали (перпендикулярно радиус-вектору в плоскости орбиты);
- 2) маневр с управляющим ускорением, направленным по радиус-вектору;
- 3) маневр с управляющим ускорением, направленным по нормали к плоскости орбиты.

Моделирование осуществлялось при следующих исходных данных:

- тяга двигательной установки КА: 0,1 Н, 1 Н и 15 Н;
- в начальный момент времени КА и ОКМ находились на расстоянии 15 км;
- начальные векторы движения КА и ОКМ выбраны таким образом, что при отсутствии маневров КА и ОКМ должны столкнуться;
- момент окончания маневра принимался постоянным и равным моменту времени вероятного столкновения.

В качестве варьируемого параметра помимо направления и величины тяги двигательной установки был выбран момент времени начала активного участка.

В результате моделирования необходимо определить наиболее выгодную стратегию управления КА при проведении защитного маневрирования, то есть при минимальных затратах рабочего тела обеспечить безопасное расстояние между КА и ОКМ.

В табл. 1 приведены результаты моделирования защитного маневрирования при совершении трансверсального, радиального и бокового маневров.

Были получены оценки затрат характеристической скорости и относительного расстояния между КА и ОКМ в результате совершения защитного маневра КА с ДУ различной тяги. Полученные данные позволили сформировать обоснованное мнение о целесообразности выбора того или иного варианта защитного маневрирования геостационарным КА с учетом регулярных коррекций для компенсации влияния вековых и усредненных периодических составляющих возмущений параметров орбиты.

Полученные результаты показывают, что при выполнении защитного маневрирования наиболее эффективным с точки зрения затрат характеристической скорости является боковой маневр.

Исходя из технических возможностей средств контроля космического пространства определения координат ОКМ (КА) на ГСО, КА необходимо совершать защитный маневр уклонения таким образом, чтобы расстояние от ОКМ в момент потенциальной встречи было не менее 500 м. Если для ДУ с малой тягой (0,1 Н) предпочтительным является трансверсальный маневр, то при использовании ДУ со средней (1 Н) и большой (15 Н) тягой более предпочтительным будет боковое маневрирование. При этом при боковом маневрировании вероят-

ность выхода за границы точки стояния гораздо ниже, чем при совершении радиальных и трансверсальных маневров.

Таблица 1

Результаты моделирования защитного маневрирования на ГСО

№ п/п	Тяга ДУ, Н	Длитель- ность ма- невра, с	Затраты хар. скорости, м/с	Относительная дальность после выполнения маневрирования, м		
				трансверсальное	радиальное	боковое
1	0,1	1200	0,048027	47,4	46,34	2,64
2		1800	0,072062	95,0	97,0	13,3
3		2400	0,09611	169,0	170,0	14,23
4		3000	0,120172	262,5	265,2	15,3
5	1,0	1200	0,480274	367,0	371,5	17,5
6		1800	0,720618	718,1	725,1	971,1
7		2400	0,961098	1133,9	1142,9	1610,2
8		3000	1,201717	1590,5	1595,5	2249,7
9	15,0	150	0,900064	206,0	219,0	264,0
10		300	1,800257	470,46	483,5	602,5
11		450	2,700579	764,28	765,6	918,8
12		600	3,601029	1058,5	1055,5	1234,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показывает, что при выполнении защитного маневрирования в большинстве случаев наиболее эффективным с точки зрения затрат характеристической скорости является боковой маневр. Однако, если на КА установлены двигатели с малой тягой, то более предпочтительными являются трансверсальные маневры.

При проведении защитного маневрирования желательно, чтобы КА оставался в пределах окрестности «точки стояния», а при выходе за пределы точки стояния для возобновления выполнения целевых задач необходимо в кратчайшее время восстановить свое местоположение.

Список используемых источников

1. Современные технологии навигации геостационарных спутников / Ю.М. Урличич, С.А. Ежов, А.И. Жодзишский и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 280 с.
2. Чернявский Г.М., Бартенов В.А., Малышев В.А. Управление орбитой стационарного спутника. – М.: Машиностроение, 1984. – 144 с.
3. Вениаминов С.С. Комический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 208 с.
4. The Kessler syndrome: Implications to Future Space Operations/ Kessler D. et al. // 33rd Annu. American Astronautical Soc. Rocky Mountain Section. Guidance and Control Conf. – Breckinridge, Colorado, USA, 2010.
5. Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами: учеб. пособие / под ред. Л.Н. Лысенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – Ч. 1. – 476 с.
6. Бэттин Р. Наведение в космосе. – М.: Машиностроение, 1966. – 406 с.

7. Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г. Основы механики космического полета. – М.: Наука, 1990. – 448 с.
8. Мирер С.А. Механика космического полета. Орбитальное движение. – М.: Резолит, 2007. – 106 с.
9. Горбулин В.И. Оптимизация развертывания космических систем: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – 102 с.
10. Таха, Хамеди А. Введение в исследование операций: пер. с англ. – 7-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 912 с.
11. Авксентьев А.А., Котяшов Е.В. Результативность сближения космического аппарата с пассивным объектом в условиях действия случайных возмущений // Тр. XXXII Всерос. НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», 27—28 июня 2013 г. – 2013. – № 3. – С. 18–24.

Д.Д. Зыков,
кандидат военных наук;
А.А. Исупов;
К.А. Крупский,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ СОСТАВА СРЕДСТВ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛИГОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОД ЗАДАННЫЙ СЦЕНАРИЙ ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Разработана методика обоснования состава средств траекторных измерений полигонного измерительного комплекса в интересах оценивания его готовности к обеспечению испытаний образцов вооружения, военной и специальной техники с учетом требований к точности оценивания параметров их движения, а также формирования оптимальных планов измерений на базе обоснованного состава разнотипных средств траекторных измерений при обеспечении испытаний сложных образцов вооружения.

Ключевые слова: объект испытаний, параметры движения, показатель точности, полигонный измерительный комплекс, средства траекторных измерений, экспериментально-испытательная база.

ВВЕДЕНИЕ

Для обоснования состава средств траекторных измерений (ТИ) полигонного измерительного комплекса (ПИК) под сценарий проведения натурного эксперимента необходимо оценить возможности таких средств экспериментально-испытательной базы по обеспечению испытаний образцов вооружения [1, 2]. Для решения данной задачи следует оценить влияние состава разнотипных средств ТИ из состава ПИК, их тактико-технических характеристик, состава измеряемых параметров, а также других факторов на точность оценивания параметров движения объекта испытаний (ОИ).

Под ОИ понимается испытываемый образец вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ). Под сценарием проведения натурного эксперимента понимается совокупность измерительных пунктов, средств обеспечения проведения испытаний, условий проведения испытаний (трассы полета ОИ, мишеней, зоны безопасности и т. д.), применение (задействие) которых осуществляется в соответствии с заранее определенным планом.

Оценки параметров движения ОИ в заданной точке пространства характеризуются случайным вектором, который может быть записан в следующем виде:

$$\hat{\theta} = [\hat{q}_1 \mid \hat{q}_2 \mid \cdots \mid \hat{q}_K]^T, \quad (1)$$

где $\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_K$ – оценки параметров движения ОИ;

K – количество оцениваемых параметров движения ОИ.

Если вектор $\hat{\theta}$ распределен по нормальному закону, то случайные составляющие погрешностей оценок параметров движения ОИ характеризуются ковариационной матрицей $\gamma_{\hat{\theta}}$ вида [1, 2]

$$\gamma_{\hat{\theta}} = \begin{vmatrix} \sigma^2 \hat{q}_1 & \text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_2) & \cdots & \text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_K) \\ \text{cov}(\hat{q}_2, \hat{q}_1) & \sigma^2 \hat{q}_2 & \cdots & \text{cov}(\hat{q}_2, \hat{q}_K) \\ \vdots & & & \vdots \\ \text{cov}(\hat{q}_K, \hat{q}_1) & \text{cov}(\hat{q}_K, \hat{q}_2) & \cdots & \sigma^2 \hat{q}_K \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где $\sigma^2 \hat{q}_1, \sigma^2 \hat{q}_2, \dots, \sigma^2 \hat{q}_K$ – дисперсии оценок параметров движения ОИ;
 $\text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_2), \text{cov}(\hat{q}_2, \hat{q}_1), \dots, \text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_K)$ – ковариации оценок параметров движения ОИ.

В составе погрешностей измерений присутствуют систематические составляющие, вызванные различными факторами (неточная привязка результатов измерений ко времени, погрешности геодезической привязки мобильных (перебазируемых) средств ТИ, уход шкалы времени аппаратуры системы единого времени и т. д.) [3].

Систематические составляющие погрешностей оценок параметров движения ОИ характеризуют смещение вектора $\hat{\theta}$ относительно истинного значения и могут быть записаны в виде [4]

$$\mathbf{M}_{\hat{\theta}} = [\delta \hat{q}_1 \mid \delta \hat{q}_2 \mid \dots \mid \delta \hat{q}_K]^T, \quad (3)$$

где $\delta \hat{q}_1, \delta \hat{q}_2, \dots, \delta \hat{q}_K$ – математические ожидания оценок параметров движения ОИ.

Тогда точность оценивания параметров движения ОИ характеризуется вектором погрешности оценок параметров движения ОИ $\Delta \hat{\theta}$, который можно записать [1] как

$$\Delta \hat{\theta} = \left[(\delta^2 \hat{q}_1 + \sigma^2 \hat{q}_1)^{1/2} \mid (\delta^2 \hat{q}_2 + \sigma^2 \hat{q}_2)^{1/2} \mid \dots \mid (\delta^2 \hat{q}_K + \sigma^2 \hat{q}_K)^{1/2} \right]^T. \quad (4)$$

Для каждого типа ОИ и различных участков траектории их полета требования к точности оценивания параметров движения, как правило, задаются средними квадратическими отклонениями (СКО) оценок составляющих вектора $\hat{\theta}$ в виде [1]

$$\mathbf{D}_K = [\sigma_{\text{треб}} \hat{q}_1 \mid \sigma_{\text{треб}} \hat{q}_2 \mid \dots \mid \sigma_{\text{треб}} \hat{q}_K]^T \quad (5)$$

Тогда решение задачи обоснования состава средств ТИ возможно за счет использования обобщенного показателя эффективности ПИК [1, 5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для обоснования состава средств ТИ ПИК под заданный сценарий проведения натурного эксперимента необходимо рассчитать случайные и систематические составляющие погрешностей оценок параметров движения с учетом траектории его полета.

С использованием рассчитанных составляющих погрешностей оценок параметров движения и требований к точности их оценивания необходимо рассчитать показатель эффективности ПИК, представляющий собой вероятность попадания вершины вектора $\hat{\theta}$ в заданную область требований, по формуле [1]

$$P\{\hat{\theta} \in \mathbf{D}_K\} = \int_{(\mathbf{D}_K)} f(q_1, q_2, \dots, q_K) dq_1 dq_2 \dots dq_K, \quad (6)$$

где $f(q_1, q_2, \dots, q_K)$ – плотность распределения случайного вектора $\hat{\theta}$.

Величина требуемой вероятности попадания вершины вектора оценок параметров движения ОИ в заданную область требований имеет одинаковое значение для всех участков траектории полета ОИ [1].

При невыполнении требований к точности оценивания параметров движения ОИ меняется состав исходных данных, в первую очередь номенклатура средств ТИ. Если невозможно изменить номенклатуру средств ТИ, а в состав ПИК входят мобильные (перебазируемые) средства ТИ, то может быть решена частная задача оптимизации расположения таких средств.

Задача оптимизации расположения средств ТИ ПИК может быть решена с использованием алгоритма, разработанного в [6].

РЕШЕНИЕ

Для обоснования состава средств ТИ ПИК следует определить величины случайных и систематических составляющих погрешностей оценок параметров движения ОИ с учетом его модели движения (оценивание параметров детерминированной траектории) [7]. Для этого необходимо выполнить следующие основные этапы.

Этап 1. Расчет случайных составляющих погрешностей оценок параметров движения ОИ.

Для расчета случайных составляющих погрешностей оценок параметров движения ОИ необходимо сформировать матрицу вида [3]

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{K1} & a_{K2} & \cdots & a_{KK} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Элементы матрицы \mathbf{A} рассчитываются с использованием матрицы частных производных размерностью $L \times K$, которая записывается в виде

$$\mathbf{H} = \begin{vmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1K} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{L1} & h_{L2} & \cdots & h_{LK} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial q_1} & \frac{\partial r_1}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial r_1}{\partial q_K} \\ \frac{\partial r_2}{\partial q_1} & \frac{\partial r_2}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial r_2}{\partial q_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_L}{\partial q_1} & \frac{\partial r_L}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial r_L}{\partial q_K} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial r_1}{\partial q_1} \dots \frac{\partial r_L}{\partial q_K}$ – частные производные от измеряемых параметров по оцениваемым параметрам движения ОИ;

L – количество измеряемых параметров движения ОИ.

Размерность матрицы \mathbf{H} зависит от количества средств ТИ, измеряемых параметров движения ОИ и от количества оцениваемых параметров движения ОИ.

Элементы матрицы \mathbf{A} определяются выражением

$$a_{nm} = \sum_{l=1}^L h_{ln} \cdot \left(\frac{1}{\sigma^2 r_l} \right) \cdot h_{lm}, \quad n, m = \overline{1, K}, \quad l = \overline{1, L}, \quad (9)$$

где h_{ln}, h_{lm} – элементы матрицы \mathbf{H} ;

$\sigma^2 r_l$ – дисперсия l -го измеряемого параметра движения ОИ.

Далее необходимо обратить матрицу \mathbf{A} и привести ее к каноническому виду по формуле [1, 3]

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{U}_A^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_A = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{KK} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где \mathbf{U}_A – собственный вектор матрицы \mathbf{A} ;

$\lambda_{11}, \lambda_{22}, \dots, \lambda_{KK}$ – собственные значения ковариационной матрицы \mathbf{K}_1 .

Собственные значения ковариационной матрицы \mathbf{K}_1 характеризуют максимальные случайные составляющие погрешностей оценок параметров движения ОИ [3].

Этап 2. Расчет систематических составляющих погрешностей оценок параметров движения ОИ.

Для определения систематических составляющих погрешностей оценок параметров движения ОИ с учетом выражений (7)–(10) необходимо составить матрицу \mathbf{K}_2 , которая рассчитывается по формуле [4, 8]

$$\mathbf{K}_2 = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T \cdot \mathbf{B}^T, \quad (11)$$

где

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{P}.$$

В формулах \mathbf{P} – симметрическая матрица весовых коэффициентов; \mathbf{S} – вектор-столбец систематических погрешностей измеряемых параметров движения ОИ.

Матрица \mathbf{P} размерностью $L \times L$ записывается в виде

$$\mathbf{P} = \begin{vmatrix} \frac{1}{\sigma^2 r_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma^2 r_2} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma^2 r_L} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Вектор-столбец \mathbf{S} размерностью $L \times 1$ можно записать в виде

$$\mathbf{S} = [\delta_j r_1 \mid \delta_j r_2 \mid \dots \mid \delta_j r_L]^T, \quad j = \overline{1, J}, \quad (13)$$

где $\delta_j r_1, \delta_j r_2, \dots, \delta_j r_L$ – систематические погрешности измеряемых параметров движения ОИ j -го вида;

J – количество видов систематических погрешностей измерений.

Этап 3. Формирование вектора погрешности оценок параметров движения ОИ.

Ковариационная матрица оценок параметров движения ОИ с учетом обозначений (10) и (11) будет иметь вид

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 = \mathbf{U}_A^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_A + \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T \cdot \mathbf{B}^T. \quad (14)$$

Первое слагаемое выражения (14) представляет собой ковариационную матрицу, характеризующую максимальные случайные составляющие погрешностей оценок параметров движения ОИ, а второе – квадрат смещения математического ожидания вектора оценок параметров движения ОИ $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ относительно его истинного значения [4, 8].

Тогда с учетом уравнения (14) выражение (4) можно переписать в виде

$$\Delta \hat{\boldsymbol{\theta}} = \left[\left(k_{11, \mathbf{K}_1} + k_{11, \mathbf{K}_2} \right)^{1/2} \mid \left(k_{22, \mathbf{K}_1} + k_{22, \mathbf{K}_2} \right)^{1/2} \mid \dots \mid \left(k_{KK, \mathbf{K}_1} + k_{KK, \mathbf{K}_2} \right)^{1/2} \right]^T, \quad (15)$$

где $k_{11, \mathbf{K}_1}, k_{22, \mathbf{K}_1}, \dots, k_{KK, \mathbf{K}_1}$ – элементы главной диагонали матрицы \mathbf{K}_1 ;

$k_{11, \mathbf{K}_2}, k_{22, \mathbf{K}_2}, \dots, k_{KK, \mathbf{K}_2}$ – элементы главной диагонали матрицы \mathbf{K}_2 .

Этап 4. Расчет обобщенного показателя эффективности ПИК.

Расчет обобщенного показателя эффективности ПИК осуществляется с использованием выражений (6) и (15). При заданном значении вероятности попадания вершины вектора оценок параметров движения в заданную область требований однозначно возможно определить соответствие состава средств ТИ сценарию проведения натурального эксперимента.

Необходимо отметить, что выполнение приведенных выше этапов осуществляется для каждой точки пространства с учетом заданной модели движения ОИ, дискретности измерений средств ТИ под сценарий проведения натурального эксперимента, а также с учетом требований к точности оценивания параметров движения ОИ.

АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Для проверки работоспособности разработанной методики произведен расчет точности оценивания положения ОИ при следующих исходных данных:

- в оценивании вектора положения ОИ участвуют три средства ТИ, измеряющие азимут α и угол места β линии визирования на ОИ, а также наклонную дальность R до ОИ;
- измеряемые параметры движения ОИ моделировались по расчетной (эталонной) траектории полета ОИ;
- погрешности измерений распределены по нормальному закону;
- средства ТИ имеют определенное расположение относительно расчетной трассы полета ОИ (четыре различных варианта) в местной топоцентрической системе координат;
- средние квадратические отклонения измеряемых параметров движения ОИ средствами ТИ одинаковы для четырех вариантов расположения средства ТИ, для одного варианта расчет точности оценивания положения ОИ произведен при значениях СКО меньше заданных;
- систематическая погрешность измерений обусловлена только погрешностью геодезической привязки средств ТИ;
- требования к точности оценивания положения ОИ и требуемое значение вероятности попадания вершины вектора оценок положения в заданную область требований одинаковые для четырех вариантов расположения средства ТИ;
- дискретность измерений – 1 с.

После выполнения приведенных выше этапов получена совокупность значений погрешностей оценок положения ОИ (рис. 1,а). С использованием выражения (6), с учетом распределения погрешностей измерений по нормальному закону, рассчитаны обобщенные показатели эффективности ПИК для заданных вариантов состава средств ТИ (рис. 1,б).

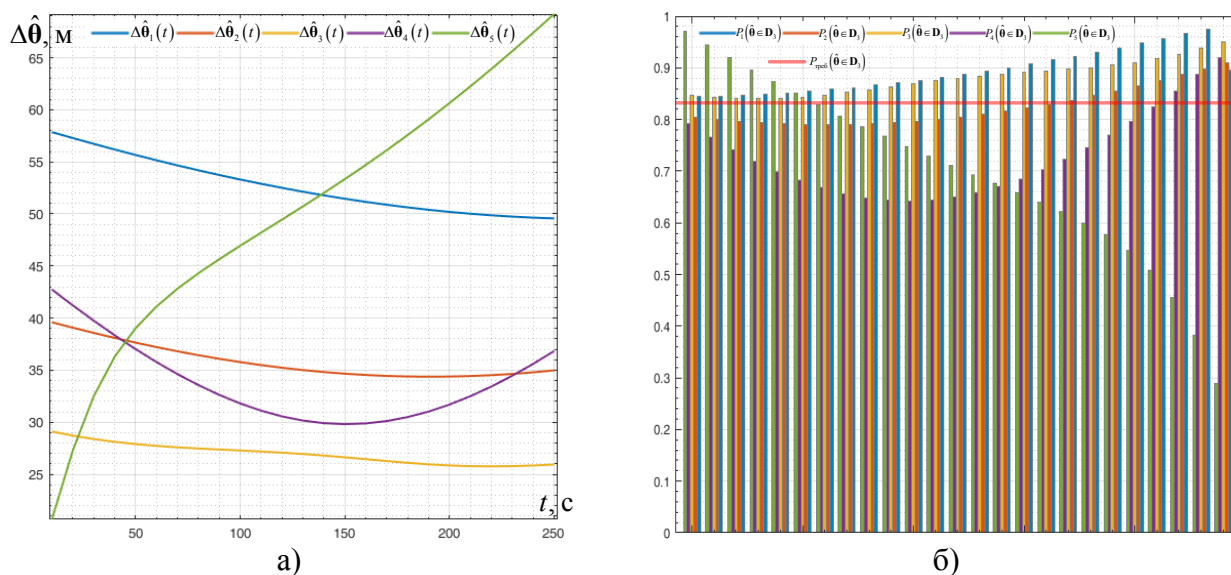


Рис. 1. Функциональные зависимости:

- а – векторов погрешности оценивания положения объекта испытаний – от состава и расположения средств траекторных измерений;
- б – обобщенного показателя эффективности ПИК – от состава и расположения средств траекторных измерений

Результаты анализа представленных выше функциональных зависимостей позволяют сделать вывод, что при заданных исходных данных из четырех вариантов размещения средств ТИ ПИК требованиям удовлетворяют два, определяющие состав средств ТИ под заданный сценарий проведения натурного эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная методика обоснования состава средств ТИ ПИК под заданный сценарий проведения натурного эксперимента позволяет определить состав средств ТИ с учетом требований к точности оценивания параметров движения ОИ и может быть использована при математическом моделировании функционирования ПИК, а также может применяться при оценивании готовности ПИК к обеспечению испытаний образцов ВВСТ.

Рассчитанные с использованием выражения (14) векторы погрешности оценок параметров движения ОИ могут являться исходными данными при решении оптимизационных задач формирования планов измерений с учетом расположения разнотипных средств ТИ ПИК испытательных полигонов при обеспечении испытаний сложных образцов ВВСТ.

Список используемых источников

1. Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И. Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем. – М.: Машиностроение, 2011. – 336 с.
2. Буренок В.М., Найденов В.Г. Методы повышения эффективности применения средств и систем обеспечения испытаний вооружения, военной и специальной техники. – М.: Издательский дом «Граница», 2006. – 274 с.
3. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / под ред. П.А. Агаджанова, В.Е. Дулевича, А.А. Коростелева. – М.: Сов. радио, 1969. – 411 с.
4. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
5. Крупский К.А., Лабецкий П.В., Успенский К.К. К вопросу оценивания готовности траекторного измерительного комплекса испытательного полигона к обеспечению испытаний образцов вооружения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652. – С. 83–90.
6. Крупский К.А. Алгоритм оптимизации расположения средств траекторных измерений из состава полигонного измерительного комплекса // Сборник трудов X научно-практической конференции молодых ученых «Вооружение и экономика». – 2017. – С. 194–199.
7. Основы радионавигационных измерений / под ред. Н.Ф. Ключева. – М.: МО СССР, 1987. – 429 с.
8. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений – М.: Радио и связь, 1983. – 303 с.

А.М. Бабин,
 П.С. Гончаров,
кандидат техн. наук, доцент;
 М.В. Житный,
кандидат техн. наук, доцент;
 Л.П. Зозуля,
кандидат техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ СОУДАРЕНИИ С ЧАСТИЦЕЙ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Предложена математическая модель процесса изменения скорости центра масс и угловой скорости относительно центра масс космического аппарата в результате высокоскоростного соударения с частицей космического мусора.

Ключевые слова: космический мусор, реактивный импульс, космический аппарат.

Одним из важных условий эффективного выполнения космическим аппаратом (КА) целевых задач является удержание заданной орбиты КА и его ориентации. Исследования показали, что с ростом степени засоренности околоземного пространства повышается вероятность воздействия частиц космического мусора (ЧКМ) на поверхность КА [1]. Из-за высокой относительной скорости соударения с большой вероятностью произойдут изменения ориентации КА в пространстве. Прогнозирование этого изменения является актуальной научно-практической задачей. Анализ результатов этих соударений позволяет заключить, что отличительной особенностью такого высокоскоростного удара является придание КА конечного импульса, значительно превышающего импульс ЧКМ. Возрастание конечного импульса объясняется выбросом материала КА в сторону, обратную направлению движения ЧКМ. В настоящей работе под реактивным движением будем понимать движение тела, обусловленное отделением от него с некоторой скоростью его части [2]. Расчет изменения угловой скорости производится относительно связанной с КА системы координат $O_1x_1y_1z_1$, оси которой исходят из центра масс и совпадают с главными осями инерции КА. Расчет изменения центра масс производится относительно осей абсолютной геоцентрической экваториальной системы координат (АГЭСК).

Конечный импульс вызовет изменение угловой скорости $\vec{\Omega}$ относительно центра масс КА и скорости центра масс $\vec{v}_{КО}$ при высокоскоростном соударении.

Зависимости для определения угловой скорости относительно центра масс, приобретенные вследствие удара, можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Omega_{x_1} &= \omega_{x_1} + \Omega_{Sx_1} + \Omega_{Rx_1}; \\ \Omega_{y_1} &= \omega_{y_1} + \Omega_{Sy_1} + \Omega_{Ry_1}; \\ \Omega_{z_1} &= \omega_{z_1} + \Omega_{Sz_1} + \Omega_{Rz_1},\end{aligned}\tag{1}$$

где $\Omega_{x_1}, \Omega_{y_1}, \Omega_{z_1}$ – проекции вектора угловой скорости КА после высокоскоростного соударения;

$\omega_{x_1}, \omega_{y_1}, \omega_{z_1}$ – проекции вектора угловой скорости КА до высокоскоростного соударения;

$\Omega_{Sx_1}, \Omega_{Sy_1}, \Omega_{Sz_1}$ – проекции вектора угловой скорости КА после высокоскоростного соударения, полученные от ударного импульса;

$\Omega_{Rx_1}, \Omega_{Ry_1}, \Omega_{Rz_1}$ – проекции вектора угловой скорости КА после высокоскоростного соударения, полученные от реактивного импульса.

На основе методики, изложенной в работе [3], значения проекций угловой скорости относительно центра масс КА, полученные от ударного импульса, будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned}\Omega_{Sx_1} &= \omega_{x_1} + S \cdot \frac{\lambda_{x_1}}{I_{x_1}}; \\ \Omega_{Sy_1} &= \omega_{y_1} + S \cdot \frac{\lambda_{y_1}}{I_{y_1}}; \\ \Omega_{Sz_1} &= \omega_{z_1} + S \cdot \frac{\lambda_{z_1}}{I_{z_1}},\end{aligned}\quad (2)$$

где $\lambda_{x_1}, \lambda_{y_1}, \lambda_{z_1}$ – проекции вектора $\vec{\lambda} = \vec{r} \times \vec{i}_S$, где \vec{i}_S – орт вектора S , \vec{r} – радиус-вектор точки соударения;

$I_{x_1}, I_{y_1}, I_{z_1}$ – моменты инерции КА относительно соответствующих осей;

S – модуль ударного импульса.

В выражении (2) $S = \frac{v_{отн}}{D}$, где $v_{отн}$ – относительная скорость соударения; при этом

$$D = \frac{1}{m_{\text{ч}}} + \frac{1}{m_{0\text{КА}}} + \frac{\lambda_{x_1}^2}{I_{x_1}} + \frac{\lambda_{y_1}^2}{I_{y_1}} + \frac{\lambda_{z_1}^2}{I_{z_1}}, \text{ где } m_{\text{ч}} - \text{масса частицы; } m_{0\text{КА}} - \text{масса КА.}$$

Для оценивания влияния реактивного импульса, возникающего за счет выброса массы при кратерообразовании, на изменение его углового положения относительно центра масс примем следующие допущения:

- реактивный импульс направлен перпендикулярно плоскости элемента конструкции КА;
- координаты $x_{\text{к}}, y_{\text{к}}, z_{\text{к}}$ точки ударного импульса лежат в таких пределах, чтобы удар приходился на плоскость конструкции КА;
- в процессе удара заведомо имеет место взрывной процесс полного превращения в газ ЧКМ и некоторой части среды, с которой произошло соударение;
- форма кратера является конической, с углом полураствора ϕ [4].

Исходя из указанных допущений, можно заключить, что реактивный импульс сонаправлен с ударным импульсом, следовательно,

$$\begin{aligned}\Omega_{Rx_1} &= Q_R \cdot \frac{\lambda_{x_1}}{I_{x_1}}; \\ \Omega_{Ry_1} &= Q_R \cdot \frac{\lambda_{y_1}}{I_{y_1}}; \\ \Omega_{Rz_1} &= Q_R \cdot \frac{\lambda_{z_1}}{I_{z_1}},\end{aligned}\quad (3)$$

где Q_R – модуль реактивного импульса, возникающего за счет выброса массы при кратерообразовании. На основании методики, изложенной в [5], модуль реактивного импульса будет определяться как

$$Q_R = \xi \cdot \sqrt{2 \cdot M \cdot E_0}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент реактивного импульса, определяемый материалом элемента конструкции КА;

E_0 – начальная кинетическая энергия;

M – масса вещества, выброшенного при кратерообразовании.

Коэффициент ξ является физической характеристикой элемента конструкции КА, который участвует во взаимодействии с ЧКМ. Данный коэффициент определяется экспериментальным путем для различных пар материалов соударяющихся объектов и не зависит от плотности, размеров и формы частицы.

Масса вещества, выброшенного при кратерообразовании, с учетом принятых допущений будет определяться массой частицы и массой вещества поверхности КА, испарившегося при ударе, в соответствии с выражением

$$M = m_{\text{ч}} + m_1, \quad (5)$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса частицы;

m_1 – масса вещества поверхности КА, испарившегося при ударе.

При высоких скоростях соударения происходит интенсивное энерговыделение в ограниченном объеме вещества, сопровождающееся формированием ударных волн с последующими механическими разрушениями, плавлением, испарением и термической ионизацией образующихся паров [6].

Исследования показывают, что при высокоскоростном соударении на поверхности элемента конструкции КА происходит образование кратера, параметры которого являются функциями массы, скорости, плотности частицы. Поэтому значение массы вещества поверхности КА, испарившегося при ударе, вычисляется по следующей зависимости:

$$m_1 = \rho_{\text{КА}} \cdot V_{\text{разр}} = \rho_{\text{КА}} \cdot \frac{1}{3} \pi \cdot R^2 \cdot H = \frac{1}{3} \cdot \rho_{\text{КА}} \cdot \pi \cdot H^3 \tan \varphi, \quad (6)$$

где H – глубина кратера;

$\rho_{\text{КА}}$ – плотность материала КА.

Глубина кратера в первом приближении связана с характеристиками соударяющихся тел эмпирическим выражением (частица рассматривается в форме шара)

$$H = 2,843 \cdot m_{\text{ч}}^{1/3} \pi^{-1/3} \cdot \rho_{\text{ч}}^{4/15} \cdot \rho_{\text{КА}}^{-3/4} \cdot \left(\frac{H_{B_{\text{ч}}}}{H_{B_{\text{КО}}}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{v_{\text{отн}}}{a_{\text{зв КА}}} \right)^{3/4}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы;

$H_{B_{\text{ч}}}$ – твердость частицы;

$H_{B_{\text{КА}}}$ – твердость материала КА;

$v_{\text{отн}}$ – относительная скорость соударения;

$a_{\text{зв КА}}$ – относительная скорость распространения звуковых волн в материале КА.

Относительную скорость распространения звуковых волн в материале КА определим по следующей формуле:

$$a_{\text{зв КА}} = \sqrt{\frac{E_{\text{КА}}}{\rho_{\text{КА}}} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}}, \quad (8)$$

где $E_{\text{КА}}$ – модуль упругости материала КА;

μ – коэффициент Пуассона для материала элемента конструкции космического аппарата [7].

С учетом вышесказанного зависимости для определения угловой скорости относительно центра масс, приобретенной вследствие удара, окончательно можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Omega_{x_1} &= \omega_{x_1} + (S + Q_R) \cdot \frac{\lambda_{x_1}}{I_{x_1}}; \\ \Omega_{y_1} &= \omega_{y_1} + (S + Q_R) \cdot \frac{\lambda_{y_1}}{I_{y_1}}; \\ \Omega_{z_1} &= \omega_{z_1} + (S + Q_R) \cdot \frac{\lambda_{z_1}}{I_{z_1}}.\end{aligned}\quad (9)$$

Очевидно, что следствием взаимодействия ЧКМ и КА будет являться и изменение положения центра масс КА относительно исходного, которое характеризуется приобретенной вследствие удара скоростью центра масс КА. Тогда значение скорости центра масс после соударения будет определяться выражением

$$v_{KA} = \sqrt{v_{x_{AГЭСК}КА}^2 + v_{y_{AГЭСК}КА}^2 + v_{z_{AГЭСК}КА}^2}, \quad (10)$$

где $v_{x_{AГЭСК}КА}$, $v_{y_{AГЭСК}КА}$, $v_{z_{AГЭСК}КА}$ – проекции скорости центра масс КА, после соударения, на оси выбранной системы координат, которые определяются выражениями:

$$\begin{aligned}v_{x_{AГЭСК}КА} &= v_{0x_{AГЭСК}КА} + v_{Rx_{AГЭСК}КА} + v_{Sx_{AГЭСК}КА}; \\ v_{y_{AГЭСК}КА} &= v_{0y_{AГЭСК}КА} + v_{Ry_{AГЭСК}КА} + v_{Sy_{AГЭСК}КА}; \\ v_{z_{AГЭСК}КА} &= v_{0z_{AГЭСК}КА} + v_{Rz_{AГЭСК}КА} + v_{Sz_{AГЭСК}КА},\end{aligned}\quad (11)$$

где $v_{0x_{AГЭСК}КА}$, $v_{0y_{AГЭСК}КА}$, $v_{0z_{AГЭСК}КА}$ – проекции начальной скорости центра масс КА на оси выбранной системы координат;

$v_{Rx_{AГЭСК}КА}$, $v_{Ry_{AГЭСК}КА}$, $v_{Rz_{AГЭСК}КА}$ – проекции скорости центра масс КА, вызванной реактивным импульсом;

$v_{Sx_{AГЭСК}КА}$, $v_{Sy_{AГЭСК}КА}$, $v_{Sz_{AГЭСК}КА}$ – проекции скорости центра масс КА, приобретенной вследствие передачи импульса соударяющейся ЧКМ.

Значения указанных проекций определяются следующими выражениями:

– от реактивного импульса

$$\begin{aligned}v_{Rx_{AГЭСК}КА} &= \frac{Q_{Rx_{AГЭСК}}}{m_{0КА} + m_{ч}}; \\ v_{Ry_{AГЭСК}КА} &= \frac{Q_{Ry_{AГЭСК}}}{m_{0КА} + m_{ч}}; \\ v_{Rz_{AГЭСК}КА} &= \frac{Q_{Rz_{AГЭСК}}}{m_{0КА} + m_{ч}},\end{aligned}\quad (12)$$

– от ударного импульса [3]

$$\begin{aligned}v_{Sx_{AГЭСК}КА} &= \frac{S_{x_{AГЭСК}}}{m_{0КА} + m_{ч}}; \\ v_{Sy_{AГЭСК}КА} &= \frac{S_{y_{AГЭСК}}}{m_{0КА} + m_{ч}}; \\ v_{Sz_{AГЭСК}КА} &= \frac{S_{z_{AГЭСК}}}{m_{0КА} + m_{ч}}.\end{aligned}\quad (13)$$

С учетом вышесказанного зависимости для определения скорости непосредственно центра масс КА, приобретенные вследствие удара, окончательно можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 v_{x_{\text{АГЭК}} \text{КА}} &= v_{0x_{\text{АГЭК}} \text{КА}} + \frac{S_{x_{\text{АГЭК}}} + Q_{Rx_{\text{АГЭК}}}}{m_{0\text{КА}} + m_{\text{ч}}}; \\
 v_{y_{\text{АГЭК}} \text{КА}} &= v_{0y_{\text{АГЭК}} \text{КА}} + \frac{S_{y_{\text{АГЭК}}} + Q_{Ry_{\text{АГЭК}}}}{m_{0\text{КА}} + m_{\text{ч}}}; \\
 v_{z_{\text{АГЭК}} \text{КА}} &= v_{0z_{\text{АГЭК}} \text{КА}} + \frac{S_{z_{\text{АГЭК}}} + Q_{Rz_{\text{АГЭК}}}}{m_{0\text{КА}} + m_{\text{ч}}}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Зависимости (9) и (14) определяют изменение положения центра масс КА и его углового положения относительно центра масс, являющегося результатом воздействия на поверхность элемента конструкции КА высокоскоростной частицы. Следует отметить, что данные зависимости учитывают не только импульс соударяющейся частицы, но и реактивный импульс, возникающий за счет выброса вещества при кратерообразовании.

Проведенные с использованием предлагаемой модели расчеты показывают, что при относительной скорости соударения 12 км/с алюминиевой частицы диаметром 3 мм и элемента конструкции КА, выполненного из алюминия (масса КА 1500 кг), значение реактивного импульса, приобретенного в процессе кратерообразования, превышает количество движения (импульс) частицы в 20 раз.

Выводы. Таким образом, разработанная математическая модель изменения положения центра масс и углового положения КА позволяет осуществлять прогнозирование влияния соударения ЧКМ с поверхностью КА. При этом модель учитывает влияние как импульса, передаваемого непосредственно от частицы, так и реактивного импульса, возникающего в процессе кратерообразования в результате соударения. Проведенные расчеты показали, что влияние реактивного импульса на процесс изменения положения центра масс и углового положения КА на порядок превышает влияние импульса, передаваемого от частицы.

Использование разработанной математической модели позволяет вырабатывать обоснованные требования к элементам защиты КА и материалам, используемым для уязвимых элементов конструкции КА. Кроме того, полученные в процессе моделирования результаты могут являться основой для прогнозирования степени возможной потери ориентации КА вследствие воздействия на него высокоскоростных ЧКМ.

Список используемых источников

1. Космический мусор: в 2 кн. / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – Кн.1: Методы наблюдения и модели космического мусора. – 248 с.
2. Высокоскоростные ударные явления / под ред. В.Н. Николаевского. – М.: Мир, 1973. – 533 с.
3. Методика определения угловой скорости и перегрузки космического аппарата в результате столкновения с частицей космического мусора / П.С. Гончаров, А.М. Денисов, Л.П. Зозуля, И.С. Прохватова // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 639. – С. 214–221.
4. Станюкович К.П. Элементы теории удара твердых тел с большими (космическими) скоростями // Искусственные спутники Земли: сб. – 1960. – Вып. 4. – С.109.
5. Архипов Б.А., Степанов Ю.С. О реактивном импульсе при кратерообразовании и моделировании процессов соударения // ПТМФ. – 1965. – №3.
6. Телегин А.М., Семкин Н.Д. Космическая пыль и ее взаимодействие с космическими аппаратами: учеб. пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 124 с.
7. Леонтьев Л.В., Тарасов А.В., Терешкин И.А. Некоторые особенности формы кратеров, образованных высокоскоростными частицами в полубесконечной преграде // Космические исследования. – 1971. – Т. 9, №5. – 796 с.

В.В. Бурмистров,
кандидат техн. наук;
М.Ю. Зоткин,
кандидат техн. наук;
А.М. Ричняк,
кандидат техн. наук, доцент

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Статья посвящена актуальным проблемам разработки сверхпроводящих магнитных исполнительных органов для систем ориентации и стабилизации малых космических аппаратов. Предлагаемые исполнительные органы выполнены на основе новых сверхпроводников, так называемых высокотемпературных сверхпроводников. Получены их основные технические характеристики, и проведен сравнительный анализ одного из разработанных вариантов исполнительного органа с магнитными исполнительными органами традиционного исполнения. Даны практические рекомендации по использованию сверхпроводящего магнитного исполнительного органа для систем ориентации и стабилизации малых космических аппаратов.

Ключевые слова: сверхпроводящий магнитный исполнительный орган, высокотемпературный сверхпроводник, сверхпроводящий короткий соленоид, сверхпроводящий ключ-перемычка, криогенная установка, карданов подвес.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений совершенствования систем ориентации и стабилизации (СОС) малых космических аппаратов (МКА) является использование в них сверхпроводящих магнитных исполнительных органов (СМИО) вместо традиционных магнитных исполнительных органов (МИО) [2–5], которые характеризуются малыми значениями управляющего момента и существенным возрастанием энергопотребления и массы при увеличении управляющего момента. Кроме того, традиционные МИО имеют достаточно большие габаритные характеристики и вызывают серьезные трудности при компоновке КА.

Наиболее перспективным, на наш взгляд, является применение в МИО сверхпроводящих материалов, работающих при повышенных криогенных температурах, а именно на уровне температуры жидкого азота 77,33 К или более высоком – до 125 К, т. е. так называемых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [4].

В статье предложены классификация и варианты конструктивного исполнения СМИО для СОС МКА, а также результаты расчета их технических характеристик для разработанных вариантов исполнительных органов и проведен сравнительный анализ сверхпроводящих магнитных исполнительных органов с магнитными исполнительными органами традиционного исполнения. Даны практические рекомендации по использованию предложенных СМИО для каждого типа систем ориентации и стабилизации МКА.

СТРУКТУРА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАГНИТНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

В зависимости от степени подвижности относительно корпуса КА сверхпроводящего короткого соленоида (СКС) разрабатываемый исполнительный орган может иметь два варианта исполнения:

- 1) со СКС, установленным в двухступенном управляемом кардановом подвесе (КП);

2) с тремя СКС, неподвижными относительно корпуса КА.

В зависимости от назначения магнитной СОС и, следовательно, в зависимости от способа питания СКС, первый вариант структурного исполнения СМИО может иметь два варианта реализации.

1. СМИО на основе СКС и сверхпроводящего ключа-перемычки (СКП), установленных в КП. Данный исполнительный орган может быть использован в таких режимах, как в режиме предварительного успокоения КА, а также в режиме ориентации аппарата по МПЗ. Магнитную систему с указанным СМИО целесообразно использовать в комплексе с гравитационной СОС.

2. СМИО на основе СКС, установленного в КП, без СКП. Этот исполнительный орган, как и вариант с тремя неподвижными СКС, рекомендуется использовать во всех рассматриваемых режимах управления КА: в режиме предварительного успокоения, режиме разгрузки двигателя-маховика (ДМ) основной СОС и в режиме ориентации и стабилизации связанных осей аппарата в базовой системе координат.

Разработанные варианты СМИО отличаются своими функциональными возможностями. Они могут быть рекомендованы к использованию на различных типах КА в зависимости от типа орбиты, технических характеристик аппарата и режима работы СОС.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Функциональные схемы трех разработанных вариантов исполнения СМИО представлены на рис. 1, где приняты следующие обозначения: СКС – сверхпроводящий короткий соленоид, СКП – сверхпроводящий ключ-перемычка с тепловым управлением, СЗ – система запитки СКС СМИО, КУ – криогенная установка, ХДТ – датчик Холла, ТД – температурный датчик, Д₁, Д₂ – электроприводы поворота платформы и внешней рамы КП, ДУП₁, ДУП₂ – датчики углового положения платформы и внешней рамы КП, БУ СМИО – блок управления СМИО, ДУ – датчик угла, ДУС – датчик угловой скорости, ТГ – тахогенератор, СТ – силовые токовводы, М – механизм управления силовыми токовводами.

1. Конструкция СМИО на основе СКС и СКП в КП.

Функциональная схема рассматриваемого СМИО представлена на рис. 1,а. Обмотка СКС СМИО односекционная. Витки ВТСП-провода отделены друг от друга специальной электрической изоляцией. Провод соленоида представляет собой многожильный композит, каждая жила состоит из подложки-металла (алюминия высокой чистоты) нанесенной на нее по технологии лазерного импульсного напыления ВТСП материала.

Конструкция СКП представляет собой две бифилярно намотанных на один каркас обмотки ВТСП-провода и провода из металла с высокой теплопроводностью. Для увеличения коэффициента намотки обмотки СКП композитный ВТСП-провод выполняется в виде прямоугольного сечения. Жила композита делается по аналогичной технологии, как и жила ВТСП-провода обмотки СКС. Провод из обычного металла является нагревательным элементом СКП, который необходим для перевода ВТСП-провода из сверхпроводящего в нормальное состояние за счет увеличения температуры охлаждения на 5-6 К. Материалом нагревательного элемента является сплав следующего состава: 48 % Cu-13% Mn-3% Al.

СКС и СКП помещены в общий для них криостат, который выполняет функцию платформы КП. Внутренняя стенка криостата помимо защитных функций выполняет функцию каркаса СКС. Для охлаждения обмоток СКС и СКП на уровне – 75–80 К предусмотрены дюралюминиевые трубки, которые помещены во внутреннюю область сверхпроводящих обмоток.

Кроме того, СММО дополнительно снабжен жестко прикрепленной к платформе КУ, которая связана со СКС и СКП двумя парами теплоизолированных трубопроводов, по одному на каждый, с различной выходной температурой хладагента.

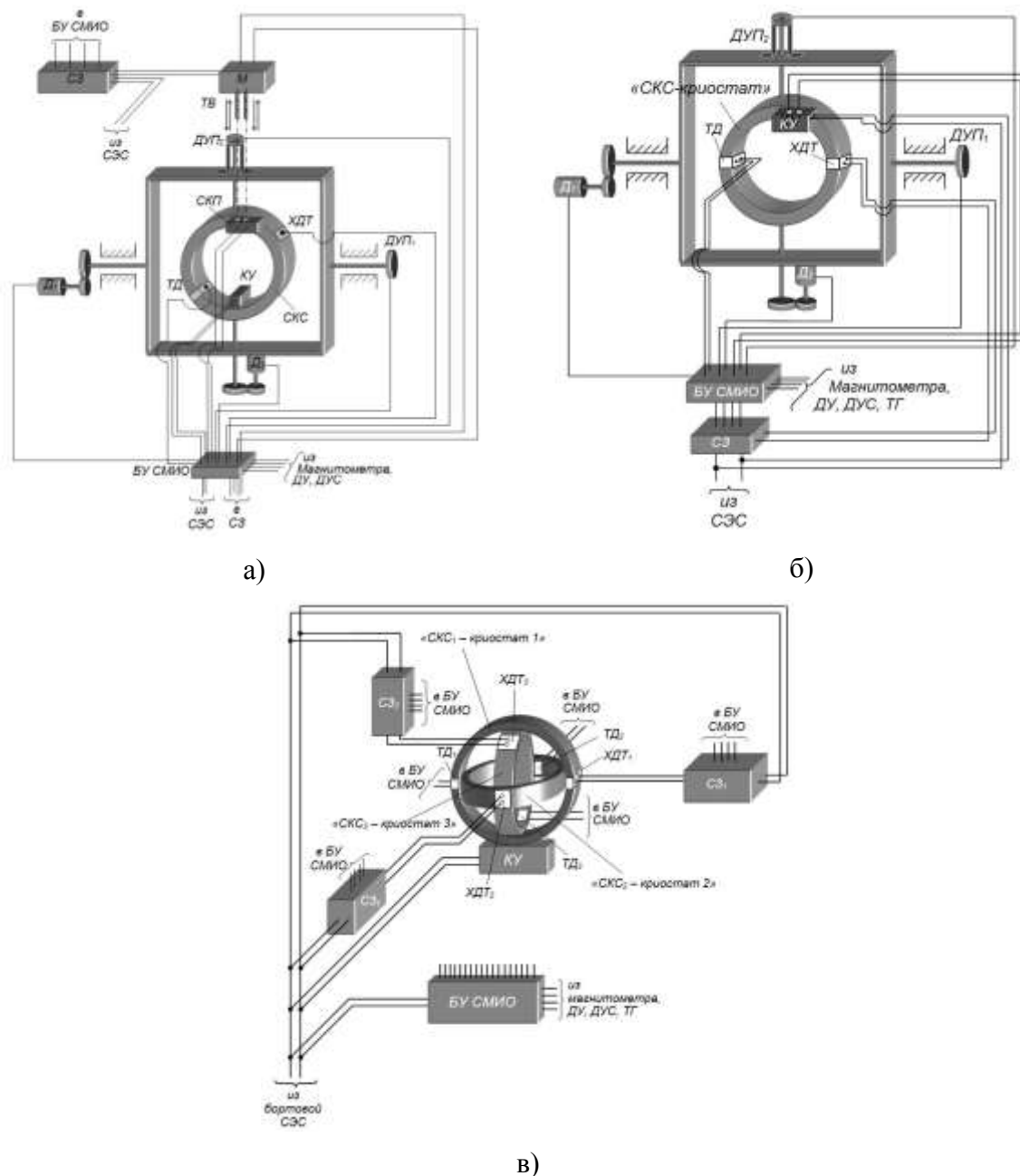


Рис. 1. Функциональные схемы трех вариантов конструктивного исполнения СММО СОС МКА:

а – СММО на основе СКС и СКП в КП; б – СММО на основе СКС в КП;
в – СММО на основе трех неподвижных СКС

КУ, ТД и система управления КУ, расположенная в БУ СММО, объединены в подсистему обеспечения сверхпроводящего состояния обмотки СКС и СКП. Данная подсистема представляет собой систему автоматического регулирования с обратной связью по температуре криостатирования СКС и СКП.

Для установления необходимого направления магнитного момента СКС используются электроприводы D_1 и D_2 поворота платформы и внешней рамы КП, а для определения текущего положения рамок и платформы – датчики углового положения ДУП₁ и ДУП₂.

Питание СКС током осуществляется от бортовой СЭС через СЗ, подвижные СТ, которые управляются специальным механизмом (М) их подъема и опускания в контактные гнезда, установленные на криостате непосредственно в месте установки СКП. Для регистрации тока в обмотке СКС и температуры внутри криостата используются датчик Холла и температурный датчик. Для питания СКС током и защиты его от несвоевременного перехода в нормальное состояние разработана СЗ.

Система питания СКС СМНО представляет собой систему автоматического регулирования по току СКС и состоит (рис.2) из ОЗУ – основного зарядного устройства типа преобразователь неизменной мощности, КЗУ – компенсирующего зарядного устройства, ЕН – емкостного накопителя электрической энергии, ПЗК – прямого запираемого ключа, ОЗК – обратного запираемого ключа, ПБК – прямого блокирующего ключа, ОБК – обратного блокирующего ключа, БД₁, БД₂ – блокирующих диодных вентилях, ТВ₁, ТВ₂ и КГ₁, КГ₂ – силовых подъемных токовводов и силовых контактных гнезд, М – механизмов управления ТВ₁, ТВ₂.

Для реализации требуемого закона изменения тока в обмотке СКС (управление системой питания), поддержания необходимого температурного режима внутри криостата, а также защиты СКС от несвоевременного выхода СКС из сверхпроводящего состояния служит блок управления СМНО.

В блок управления СМНО поступают сигналы от трехкомпонентного магнитометра, ДУ, ДУС, ДУП₁, ДУП₂, ХДТ и ТД. Из БУ СМНО поступают управляющие сигналы на: тиристорные ключи СЗ, нагревательный элемент СКП, в механизм подъема и опускания силовых токовводов и в электроприводы D_1 и D_2 поворота платформы-криостата и внешней рамы КП.

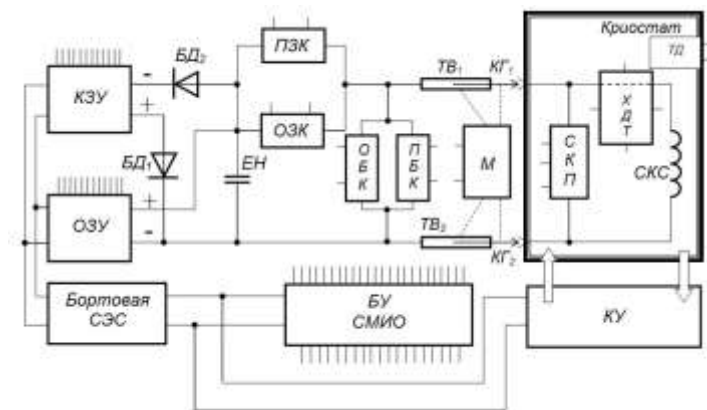


Рис. 2. Схема системы питания СМНО на основе СКС и СКП в КП

2. Конструкция СМНО на основе СКС в КП.

Функциональная схема рассматриваемого СМНО представлена на рис. 1,б. Особенностью предлагаемого варианта СМНО, в отличие от ранее рассмотренного, является отсутствие СКП, подвижных силовых токовводов и механизма управления ими.

Предлагаемый СМНО содержит: СКС с обмоткой из композитного провода на основе ВТСП-материала с дюралевого трубкой для его охлаждения; криостат, выполняющий роль платформы, внутри которого помещен СКС и КП с двумя степенями свободы. КП включает: платформу, внешнюю раму и внутреннюю раму, датчики ДУП₁, ДУП₂ и электроприводы D_1 , D_2 . Ось внешней рамы КП крепится к корпусу КА таким образом, чтобы центр СКС был практически совмещен с центром масс аппарата или находился близко к нему. СМНО до-

полнительно снабжен жестко прикрепленной к платформе КУ, связанной с СКС теплоизолированными трубопроводами, а с бортовой СЭС – гибкими проводами.

Второй особенностью рассматриваемого СМНО является наличие новой СЗ, представляющей собой систему автоматического регулирования с обратной связью по току СКС. Она состоит (рис. 3) из инвертора регулируемой частоты (ИРЧ) с трансформаторным выходом и отводом от средней точки его вторичной обмотки и однофазного двухфазного выпрямителя (ОДФВ). Входы БУ СМНО связаны с ТД, ХДТ, ДУП₁, ДУП₂, ДУ, ДУС, трехкомпонентным магнитометром и ТГ, а его управляющие выходы – с электроприводами КП Д₁ и Д₂, КУ, ИРЧ. Входы питания БУ СМНО подключены к шинам бортовой СЭС.

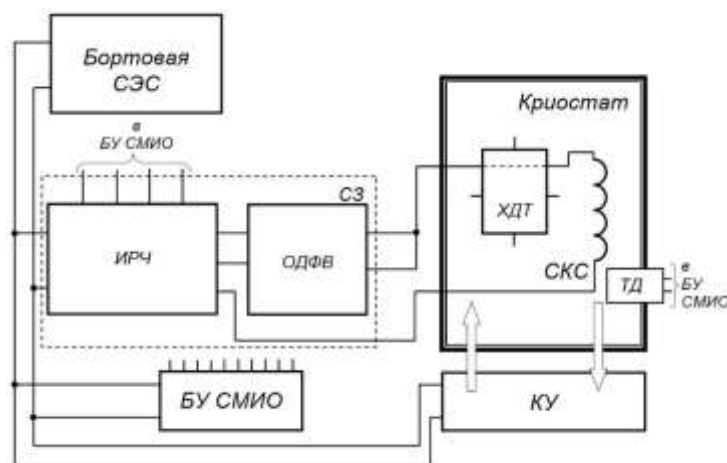


Рис. 3. Схема системы питания СМНО на основе СКС в КП

3. Конструкция СМНО на основе трех СКС.

Функциональная схема такого СМНО представлена на рис. 1, в.

Рассмотренные выше варианты СМНО имеют такой существенный недостаток, как подвижные элементы конструкции: подвижные токовводы, платформа и внешняя рама КП. Наличие подвижных элементов конструкции понижает показатели надежности этих СМНО.

В отличие от рассмотренных выше исполнительных органов, предлагаемый СМНО содержит (см. рис. 1, в) три неподвижных относительно КА, ортогональных друг другу сверхпроводящих соленоидов – СКС₁, СКС₂ и СКС₃ с обмотками из композитного провода с жилами из ВТСП-материала. Каждая из обмоток СКС помещена в свой криостат: криостат 1, криостат 2, криостат 3.

Криостаты обмоток СКС жестко скреплены с корпусом КА таким образом, чтобы центры масс трех конструкций «СКС-криостат» практически совпадали с центром масс аппарата или находились близко к нему.

На рис. 4 показана схема СЗ трех СКС СМНО. Криостаты каждого СКС связаны между собой и с КУ теплоизолированными трубопроводами. Регулирование температуры на уровне 75–80 К в обмотках СКС осуществляется подсистемой обеспечения сверхпроводящего состояния, состоящей из трех температурных датчиков (ТД₁, ТД₂, ТД₃), установленных внутри каждого криостата; КУ; теплоизолированных трубопроводов и дюралюминиевых трубок охлаждения СКС и системы управления КУ, установленной в БУ СМНО.

Каждый СКС, как и в предыдущем варианте конструкции СМНО, снабжен своей подсистемой запитки (СЗ₁, СЗ₂, СЗ₃), состоящей из инверторов регулируемой частоты (ИРЧ₁, ИРЧ₂, ИРЧ₃, и ИРЧ₁', ИРЧ₂', ИРЧ₃') и однофазных двухфазных выпрямителей (ОДФВ₁, ОДФВ₂, ОДФВ₃ и ОДФВ₁', ОДФВ₂', ОДФВ₃'), с разнополярными выходами. Выходы ИРЧ подключены через ОДФВ к специальным токовводам обмоток СКС, а их входы – к шинам бортовой СЭС. Для регулирования величины и направления тока в обмотках СКС в цепь СЗ включены датчики Холла (ХДТ₁, ХДТ₂, ХДТ₃), информация от которых поступает в БУ

СМИО. Управляющие входы и выходы БУ СМИО подключены к ИРЧ. Изменение величины и направления тока в обмотках СКС осуществляется за счет изменения частоты ИРЧ.

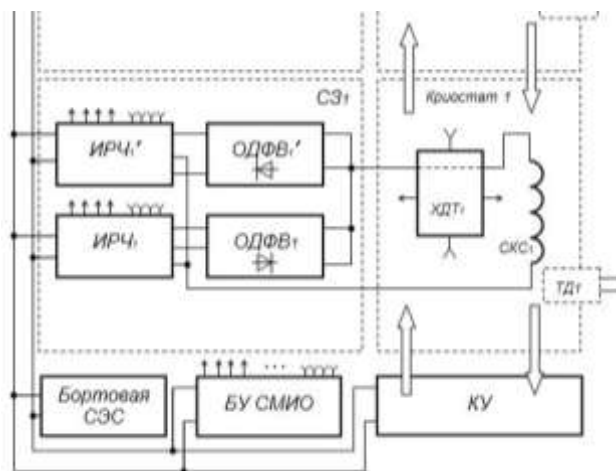


Рис 4. Схема системы питания трех СКС СМИО

Входы БУ СМИО связаны с ДУ, ДУС, трехкомпонентным магнитометром и тахогенератором (ТГ), выходная информация которых участвует в формировании закона управления токов СКС.

Формирование управляющего момента в СМИО аналогично тому, как это осуществляется в МИО на основе трех электромагнитов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Была разработана методика определения технических характеристик СМИО, реализованная в виде совокупности частных методик расчета основных узлов, входящих в его состав.

По результатам предложенной методики в качестве примера в табл. 1 приводятся результаты расчета массово-энергетических характеристик СМИО на основе трех неподвижных СКС. Для сравнения в ней приведены результаты расчета массово-энергетических характеристик МИО на основе трех электромагнитов. В таблице приняты следующие обозначения: L – максимальный магнитный момент исполнительного органа; $m_{\text{МИО}}$ и $P_{\text{МИО}}$ – полная масса и потребляемая мощность МИО; $m_{\text{СМИО}}$ и $P_{\text{СМИО}}$ – полная масса и потребляемая мощность СМИО.

Таблица 1

Результаты расчета массово-энергетических характеристик МИО традиционного исполнения и СМИО на основе трех СКС

$L, \text{А} \cdot \text{м}^2$	10	30	100	250	300	400	500	600
$m_{\text{МИО}}, \text{кг}$	0,814	1,526	3,078	5,930	7,091	9,455	11,818	14,182
$P_{\text{МИО}}, \text{Вт}$	2,612	3,856	5,681	8,075	9,894	12,715	15,894	19,073
$m_{\text{СМИО}}, \text{кг}$	0,868	1,013	1,274	1,723	2,031	2,384	2,772	3,201
$P_{\text{СМИО}}, \text{Вт}$	1,436	1,931	2,319	5,093	5,863	7,425	8,942	10,517

Проведен сравнительный анализ СМНО и МНО по следующим введенным показателям: удельному магнитному моменту по массе (L_{*m}) и удельному магнитному моменту по мощности (L_{*p}).

1. Удельный магнитный момент по массе для МНО и СМНО определяется как отношение

$$L_{*m} = \frac{\sqrt{3L_i^2}}{m_{\text{но}}}, \text{ где } L_i - \text{максимальный магнитный момент } i\text{-го электромагнита или } i\text{-го СКС,}$$

установленного по соответствующей оси связанной системы координат; $m_{\text{но}}$ – полная масса исполнительного органа (МНО или СМНО).

2. Удельный магнитный момент по мощности есть отношение $L_{*p} = \frac{\sqrt{3L_i^2}}{P_{\text{но}}}$, где $P_{\text{но}}$ –

суммарная потребляемая мощность исполнительных органов.

На рис. 5 показаны результаты расчета удельных магнитных моментов по массе (рис. 5,а) и по мощности (рис. 5,б) для МНО и СМНО от их магнитного момента.

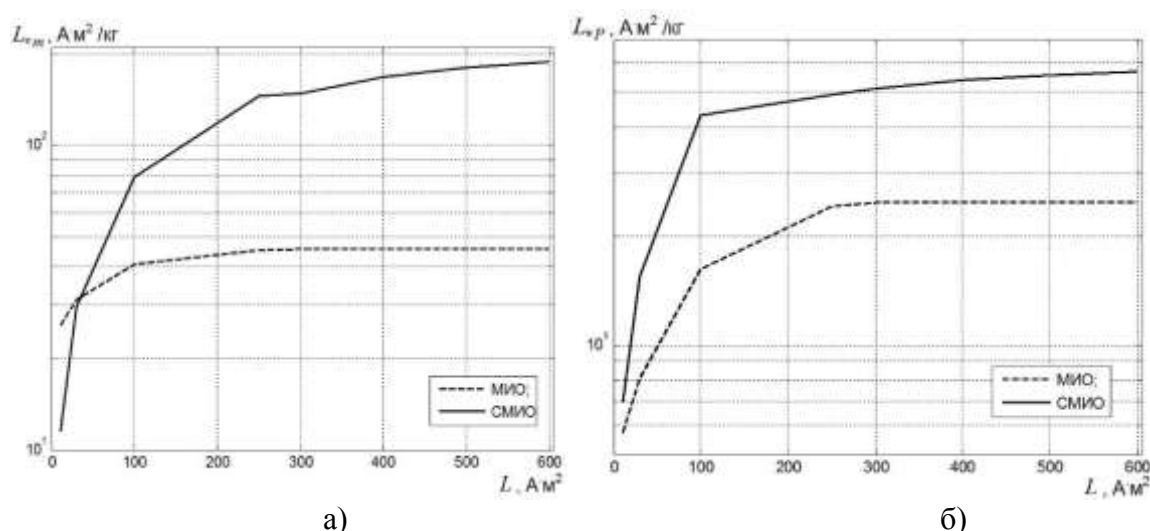


Рис. 5. Зависимости удельных магнитных моментов по массе и по мощности для МНО и СМНО от их магнитных моментов

Из анализа рис. 5,а следует, что по удельному магнитному моменту L_{*m} СМНО по массе на основе трех неподвижных СКС, начиная с магнитного момента 30 А·м^2 , существенно превосходит МНО на основе трех электромагнитов. И при увеличении магнитного момента до 600 А·м^2 эта разница становится все существенней. Например, при магнитном моменте 600 А·м^2 удельный магнитный момент по массе для МНО на основе трех электромагнитов составляет $L_{*m} \approx 46 \text{ А·м}^2/\text{кг}$, тогда как для СМНО эта величина равна $187 \text{ А·м}^2/\text{кг}$ соответственно, т. е. приблизительно в 4 раза больше, чем у МНО традиционного исполнения.

Из анализа рис. 5,б следует, что СМНО по удельному магнитному моменту L_{*p} превосходит МНО на всем интервале магнитных моментов. Так, например, для магнитного момента, равного 400 А·м^2 , удельный магнитный момент по мощности для МНО составляет $24,86 \text{ А·м}^2/\text{Вт}$, тогда как удельный магнитный момент для СМНО составляет $L_{*p} \approx 53,8 \text{ А·м}^2/\text{Вт}$, что приблизительно в 2,2 раза больше, чем у МНО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследований, посвященные разработке СМНО для СОС МКА, обмотки которых выполнены из новых сверхпроводников, так называемых ВТСП. Предложены классификация и три варианта исполнения СМНО: СМНО на основе СКС и СКП в КП; СМНО на основе СКС в КП; СМНО на основе трех неподвижных СКС.

В качестве примера в работе приведены численные исследования по расчету технических характеристик одного из разработанных вариантов исполнительных органов – СМНО на основе трех неподвижных СКС. Расчеты показывают, что СМНО по удельным показателям качественно превосходит МНО традиционного исполнения [9]. Кроме того, необходимо отметить, что начиная с магнитного момента $30 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, предлагается использовать СМНО, так как эффективность их применения будет выше по сравнению с МНО традиционного исполнения. Это следует из полученных расчетным путем введенных показателей L_{*m} и L_{*p} (рис. 6). СМНО с магнитным моментом от $30 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ до $100 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ могут использоваться на МКА массой от 200 до 1000 кг в режимах предварительного успокоения и разгрузки ДМ.

Список используемых источников

1. Электромагнитные системы сброса кинетического момента / Ю.П. Бычков, Ю.В. Ковш, И.А. Петрякова, Л.Н. Сигал // Сборник трудов Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Сер. Механика, управление и информатика / под ред. Г.А. Аванесова. – М.: ИКИ РАН, 2013. – С. 97–103.
2. Проблемы построения сверхпроводящих геомагнитных моментных двигателей летательных аппаратов / И.С. Гурьев, В.В. Додотченко, Б.Н. Драгунов, В.Н. Жуков // Полет: общероссийский научно-технический журнал. – 1999. – №7. – С. 31–34.
3. Пат. РФ № 2230398. Сверхпроводниковый ключ-перемычка с магнитным управлением работой сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии / А.М. Ричняк, В.В. Додотченко, С.Н. Никулин, Н.И. Олейник.
4. Ричняк А.М. Сверхпроводящий геомагнитный двигатель систем ориентации и стабилизации космических аппаратов // Сборник докладов IV научно-технической конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С. 233–240.
5. Черноплеков Н.А. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестник РАН. – 2001. – Т. 71, №4. – С. 303–319.
6. Шувалов В.А., Яковлев А.А. Определение параметров регулирования вектора магнитного момента сверхпроводящей системы управления космического аппарата // Вопросы электро-механики. – 2011. – Т. 121. – С.23–26.

И.С. Гурьев,
доктор техн. наук;
П.В. Лабецкий,
кандидат техн. наук;
А.В. Немиров

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В статье рассматриваются вопросы поиска объектов в околоземном пространстве по их собственному магнитному полю. Анализируются основные источники магнитного поля космических объектов, дан обзор современных магнитометрических средств, и приведены приближенные значения дальности обнаружения объектов.

Ключевые слова: космический объект, магнитный поиск, магнитное поле Земли, средства измерения магнитного поля, магнитометр.

ВВЕДЕНИЕ

В околоземном пространстве находится большое количество объектов: действующие и вышедшие из строя космические аппараты (КА), отработавшие разгонные блоки, а также части, оставшиеся от их разрушения – космический мусор (КМ). Масса КМ может варьироваться от граммов до нескольких тонн, его количество в околоземном пространстве постоянно растет, и это представляет серьезную опасность для функционирования КА на орбите. Поиск объектов космическими аппаратами в околоземном пространстве может служить разным целям, однако в общем его характеризуют сложность процесса, высокие затраты топлива и электроэнергии для его осуществления. Для поиска объектов могут применяться оптические и радиотехнические средства, а объектов с собственным магнитным полем – магнитометрические. Используемые в настоящее время средства поиска, функционирующие в радио- и оптическом диапазонах, имеют ряд недостатков: первые из них обладают низкой автономностью, вторые – низкой помехозащищенностью. Этих недостатков лишены магнитометрические средства измерений – магнитометры.

Средства для измерения магнитного поля Земли (МПЗ) уже применяются на борту некоторых типов КА для решения задач навигации и ориентации и доказали свою эффективность в измерении слабых магнитных полей. В то же время результаты анализа отечественной и зарубежной литературы показали, что разработка средств измерений для магнитного поиска космических объектов имеет низкий уровень.

В общем случае задача обнаружения космического объекта (КО) состоит в измерении параметров его магнитного поля (МП) на фоне МПЗ с помощью магнитометрических средств измерений, установленных на КА.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Любой КО обладает собственным МП [1–3], но его источники будут различными в зависимости от типа объекта. К основным источникам МП КО можно отнести следующие: ферромагнитные массы в составе КО, электризация протяженных частей КО, а для действующих КА – система электроснабжения (СЭС): шины питания СЭС, токовые контуры аккумуляторных и солнечных батарей.

К ферромагнитным массам КО относятся элементы двигательных установок, части конструкции бортового специального оборудования, содержащие ферромагнетики, постоянные

магниты, ферритовые сердечники и т. п. Чем тяжелее КО, тем большими ферромагнитными массами он обладает и, как следствие, большим МП. Ферромагнитные массы КО могут намагничиваться от МПЗ или от МП электрических токов на борту КА.

Электризация КО возникает в результате накопления электростатических зарядов на его поверхности вследствие движения КО в космической плазме. В местах скопления зарядов возникает разность потенциалов (до 1 кВ), что приводит к появлению МП от токов стекания. Во время магнитных бурь электризация отдельных частей КО может достигать 10–20 кВ. При этом возникающие электростатические разряды имеют следующие параметры: длительность разрядов от сотен нс до единиц мкс, пиковое значение тока – 100 А, при скорости нарастания тока – до 10^{10} А/с [2].

На величину собственного МП КА влияют мощность СЭС и режимы ее работы. По мощности СЭС КА можно разделить на три класса: легкие – мощность СЭС менее 100 Вт, средние – менее 3 кВт и тяжелые – более 3 кВт. Исходя из мощности энергопотребления бортовых систем КА, существуют следующие режимы работы СЭС: дежурный, максимальный и пиковый (импульсный) [3]. Минимальными токами в силовых цепях СЭС отличается дежурный режим работы, в котором КА может находиться длительное время. Магнитное поле КА, СЭС которого находится в дежурном режиме, в основном складывается из полей ферромагнитных масс и токов стекания, максимальное МП КА – максимальный и пиковый режимы работы его СЭС.

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения параметров магнитного поля используются специальные средства измерений – магнитометры.

В настоящее время разработано большое количество различных видов магнитометров. Они в основном применяются как вспомогательный элемент в системах ориентации и навигации подвижных объектов, для построения магнитных карт и математических моделей МПЗ, а также для поиска ископаемых.

Наиболее широко используются квантовые, феррозондовые и сверхпроводящие (СКВИД) магнитометры. Кроме того, в перспективе могут применяться магниторезистивные магнитометры [4].

В табл. 1 приведены основные технические характеристики магнитометров [1].

Таблица 1

Характеристики основных типов магнитометров

Тип магнитометра	Масса, кг	Потребление энергии, Вт	Разрешающая способность, нТл	Диапазон измерений, нТл
Сверхпроводящие (СКВИД)	>2	<12	10^{-5} – 10^{-8}	$\pm 10^5$
Квантовые	>1	<10	0,01	$\pm 2 \cdot 10^4$
Феррозондовые	>0,9	<3	0,05	$\pm 10^5$
Магниторезистивные	>0,1	<0,1	0,4	$\pm 10^5$

Из анализа характеристик магнитометров следует, что наибольшей точностью, а следовательно, и дальностью обнаружения объектов с МП обладают сверхпроводящие и квантовые магнитометры. В отличие от квантовых, применение сверхпроводящих магнитометров на КА существенно ограничено большими значениями массогабаритных характеристик и сложностью конструкции.

Опыт эксплуатации геофизических КА для измерений параметров МПЗ, указывает на целесообразность комплексного использования на борту КА квантовых магнитометров для высокоточных измерений модуля и феррозондовых магнитометров для измерений составляющих магнитной индукции.

Наименьшей массой обладают магниторезистивные магнитометры, однако в настоящее время их разрешающая способность ниже, чем у остальных магнитометров. Следует отметить, что разработка магниторезистивных магнитометров является перспективным направлением и предел повышения их точности не достигнут.

ПОИСК КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Если КО удален от датчиков магнитометров на расстояние 2-3 значений его длины, то его магнитное поле имеет чисто дипольный характер, и поэтому в месте измерения компонент индукции и их производных имеют место следующие соотношения [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} B_x X_0 + \frac{\partial}{\partial y} B_x Y_0 + \frac{\partial}{\partial z} B_x Z_0 &= -3B_x, \\ \frac{\partial}{\partial x} B_y X_0 + \frac{\partial}{\partial y} B_y Y_0 + \frac{\partial}{\partial z} B_y Z_0 &= -3B_y, \\ \frac{\partial}{\partial x} B_z X_0 + \frac{\partial}{\partial y} B_z Y_0 + \frac{\partial}{\partial z} B_z Z_0 &= -3B_z,\end{aligned}\quad (1)$$

где B_x, B_y, B_z — компоненты индукции МП, созданного КО в месте измерения;
 X_0, Y_0, Z_0 — координаты магнитного центра КО в системе координат датчиков магнитометров.

Зная величину индукцию B и ее производные, из уравнения (1) можно определить X_0, Y_0, Z_0 . Из уравнения, определяющего поле диполя, через магнитный момент M можно найти составляющие магнитного момента M_x, M_y, M_z :

$$\begin{aligned}(3X_0^2 - r_0^2)M_x + 3X_0Y_0M_y + 3X_0Z_0M_z &= 100r_0^5B_x, \\ 3Y_0X_0M_x + (3Y_0^2 - r_0^2)M_y + 3Y_0Z_0M_z &= 100r_0^5B_y, \\ 3Z_0X_0M_x + 3Y_0Z_0M_y + (3Z_0^2 - r_0^2)M_z &= 100r_0^5B_z,\end{aligned}$$

Расчетные значения дальности обнаружения различных типов объектов, в зависимости от суммарной массы ферромагнитных элементов и уровня магнитных помех в точке измерений [1], приведены в табл. 2.

Таблица 2

Дальности обнаружения ферромагнитных объектов

Характеристика ферромагнитных масс объекта, кг	Расстояние до объекта, м / амплитуда сигнала, нТл	Дальность обнаружения, м (магнитная помеха 0,5 нТл)	Дальность обнаружения, м (магнитная помеха 0,1 нТл)
Сфера, 1000	10 / 30	27	46
Сфера, 300	20 / 19	46	52
Сфера, 25	15 / 14	20	35
Тонкостенный цилиндр, 10	6 / 39	31	69

Расчетные значения дальности обнаружения КА с активной СЭС, с учетом разрешающей способности приведенных выше магнитометров, приведены в табл. 3. При проведении расчетов были приняты приближенные значения массы КА в зависимости от мощности его СЭС.

Таблица 3

Дальности обнаружения КА разными типами магнитометров

Типы магнитометров	Дальность обнаружения различных видов КА, м		
	Легкие	Средние	Тяжелые
Сверхпроводящие (СКВИД)	1065	3420	4930
Квантовые	105	340	495
Феррозондовые	60	200	290
Магниторезистивные	30	100	145

**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

На точность магнитометрических измерений влияют помехи, создаваемые собственными МП КА, а также величина МПЗ и его вариации, вызванные магнитными бурями.

Для уменьшения величины собственного МП КА могут использоваться следующие способы:

1. Минимизация токовых контуров, создающих магнитное поле, путем уменьшения длины проводников силовых цепей СЭС КА.
2. Использование витой скрутки (встречная бифилярная намотка) всех проводников с током на борту КА.
3. Экранирование мощных источников МП на борту с помощью многослойных ферромагнитных или сверхпроводящих экранов [6].
4. Удаление чувствительной аппаратуры, например датчиков магнитометров, от источников собственных МП КА.
5. Размагничивание ферромагнитных масс КА с использованием переменного убывающего тока.
6. Компенсация суммарного магнитного момента КА с помощью специальных токовых контуров.

Магнитное поле Земли достаточно хорошо изучено, существуют математические модели, описывающие с удовлетворительной точностью как само поле, так и его поведение во время магнитных бурь различного рода [5]. Вариации МПЗ охватывают большой диапазон частот, от колебаний с периодом несколько секунд до колебаний с периодом, равным нескольким десяткам лет и более. Амплитуда этих колебаний изменяется от нескольких долей до сотен и тысяч нТл, однако чем выше амплитуда, тем меньше их длительность. Введение корректирующих поправок, вычисленных по этим моделям, может повысить точность магнитометрических измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитное поле КО в околоземном пространстве зависит от его типа: действующий КА обладает МП от токов в его СЭС, МП КМ в основном определяется намагниченностью его ферромагнитных элементов. На поверхности всех типов объектов могут скапливаться электрические заряды вследствие электризации и появляться МП от токов стекания.

На дальность обнаружения КО влияют величина их МП и точность магнитометров. Практика эксплуатации КА, использующих магнитометрическую аппаратуру для геофизических исследований, показывает, что целесообразно комплексно использовать квантовые и ферро-

зондовые магнитометры. При этом расчетная дальность обнаружения КО может достигать 500 м и более.

Для увеличения дальности обнаружения объектов по измерениям МП будет полезным проведение исследований по возможности применения компенсационных токовых контуров или многослойных экранов с использованием сверхпроводящих, пермаллоевых и аморфных материалов, которые в перспективе позволяют достигнуть коэффициента экранирования более 10^7 [6]. Также следует использовать модели МПЗ и его вариации для более точной картины МП околоземного пространства, на фоне которого проводятся измерения МП КО.

Список используемых источников

1. Семеновский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия. – СПб.: Наука, 2002. – 228 с.
2. Акишин А.И. Космическое материаловедение: метод. и учеб. пособие. – М.: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
3. Системы электроснабжения космических аппаратов и ракет-носителей: учеб. пособие / Д.Л. Каргу и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 116 с.
4. ООО «НПО ЭНТ». – URL: nvlaboratory.spb.ru.html (дата обращения: 28.01.2016).
5. Математические модели неоднородного магнитного поля Земли в околоземном пространстве // Н.Н. Астахов, В.И. Горбулин, П.А. Комаров и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 644. – С. 147–152.
6. Пат. на изобретение №2204151. Устройство для экранирования магнитометров от магнитных полей КА и других объектов / Гурьев И.С., Додотченко В.В. – Приоритет от 26.06.2001.

В.А. Власов,

кандидат техн. наук, доцент;

В.И. Горбулин,

доктор техн. наук, профессор;

Д.Л. Каргу,

кандидат техн. наук, доцент;

Н.В. Радионов,

доктор экономических наук, доцент;

Д.А. Шубин

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ ЧАСТИЧНОГО ЗАТЕНЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Для вычисления сгенерированной и потребленной электроэнергии бортовыми системами космического аппарата дистанционного зондирования Земли необходимо произвести расчет ряда параметров, в том числе определить площадь затенения панелей солнечной батареи. При выполнении угловых разворотов из-за различной геометрической конфигурации космического аппарата расчет площади затенения панелей солнечных батарей достаточно сложен. В статье предложена методика оценивания частичного затенения панелей солнечных батарей, которая применима для космического аппарата любой геометрической конфигурации.

Ключевые слова: космический аппарат, солнечная батарея, затенение панелей солнечных батарей.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение спроса на информационные ресурсы и повышение интенсивности задействования космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с одной стороны, ограниченная энергопроизводительность системы электроснабжения КА и ограничения по количеству и массе аккумулирующей системы КА с другой формирует актуальную военно-техническую проблему. В основе этой проблемы лежит противоречие между повышенным расходом электроэнергии вследствие увеличения числа сеансов целевого применения и ограниченными аппаратно-программными возможностями по электропитанию бортового аппаратурного комплекса КА вследствие следующих причин:

1. Жесткая фиксация панелей солнечных батарей (ПСБ) на корпусе, которая существенно упрощает конструкцию КА, однако снижает вырабатываемую электрическую энергию на борту КА.

2. Частичное затенение панелей солнечных батарей (СБ) элементами конструкции КА в связи с особенностями конструкции.

Определение площади затенения ПСБ во время угловых разворотов КА ДЗЗ при выполнении программы полета является сложным процессом. Это связано с тем, что возвышающийся над плоскостью панелей СБ элемент конструкции, вмещающий в себя часть технологического оборудования, создает сложные фигуры тени на ограниченной площади ПСБ [1]. При наличии четырех ПСБ с расположением, представленным на рис. 1, максимальная площадь затенения элементом конструкции может достигать 25 % от общей площади всех солнечных батарей КА ДЗЗ. Но в разные моменты времени могут быть затенены разные части панелей. Таким образом, для расчета площади и расположения затененных сегментов необходимо разделить панели СБ на участки и оценивать их освещенность/затенение в каждый момент времени.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Зададим облик конструкции КА ДЗЗ. Пусть каждая панель СБ конструктивно состоит из четырех створок, а каждая створка выполнена в виде жесткого каркаса с расположенными на нем фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП). Для анализа затенения ПСБ разбивалась на участки, границы которых совпадают с границами ФЭП (рис. 1).

При разбиении центр каждого участка совпадает с геометрическим центром ФЭП и дальнейшее оперирование производится именно с ним. В пределах задачи разбиения также необходимо построить систему координат, в пределах которой будет производиться расчет затенения. В рамках данной работы она совпадает со связанной системой координат КА (рис. 1).

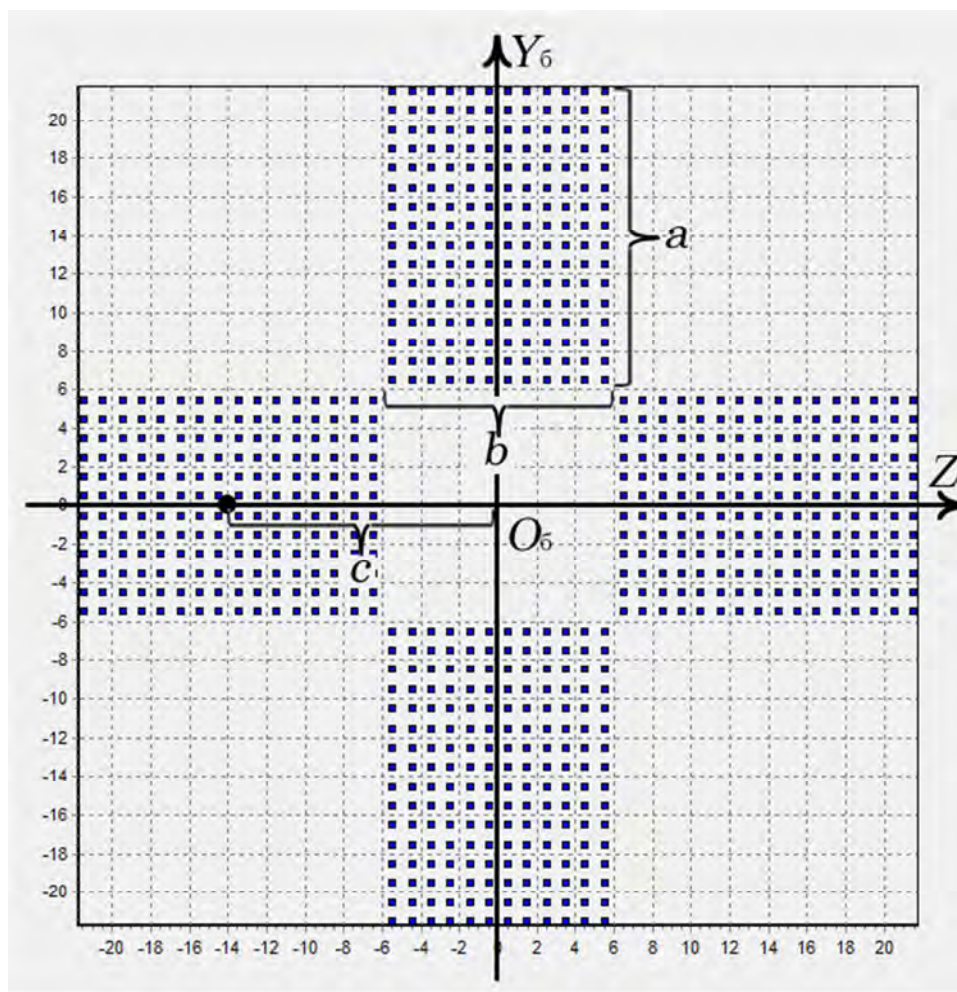


Рис. 1. Разбиение ПСБ на участки в связанной системе координат КА

Также для корректного построения точек, соответствующих центрам ФЭП необходимо указать следующие размеры:

- a – длина панели СБ;
- b – ширина панели СБ;
- c – расстояние до геометрического центра панели СБ.

Алгоритм построения массива точек, соответствующих центрам ФЭП, основан на последовательном переборе всех координат I, II, III и IV ПСБ от левого верхнего края СБ до правого нижнего. После окончания построения координат на I панели производится та же процедура перебора на панели II, расположенной против часовой стрелки и так далее до занесения в массив координаты правого верхнего ФЭП IV панели.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ ЧАСТИЧНОГО ЗАТЕНЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ КА

Для расчета степени частичного затенения ПСБ элементами конструкции КА за основу был взят алгоритм трассировки лучей. Его основной смысл поясняет рис. 2, где с применением геометрических уравнений (плоскость, поверхность, линия) проверяется взаимная видимость элемента поверхности СБ и центра масс Солнца [2].

Для определения условий «видимости» отдельных сегментов солнечной батареи в направлении центра масс Солнца введем следующие обозначения:

- f_1, f_2 – плоскости, ограничивающие элемент конструкции КА, возвышающийся над плоскостью ПСБ;
- r_1, r_2 – точки пересечения линии «Область ПСБ – Солнце»;
- $R_{\text{ц}}$ – радиус возвышающегося над плоскостью ПСБ элемента конструкции;
- $h_{\text{ц}}$ – высота выступающего над плоскостью ПСБ элемента конструкции;
- $O_6 X_6 Y_6 Z_6$ – базовая система координат КА.

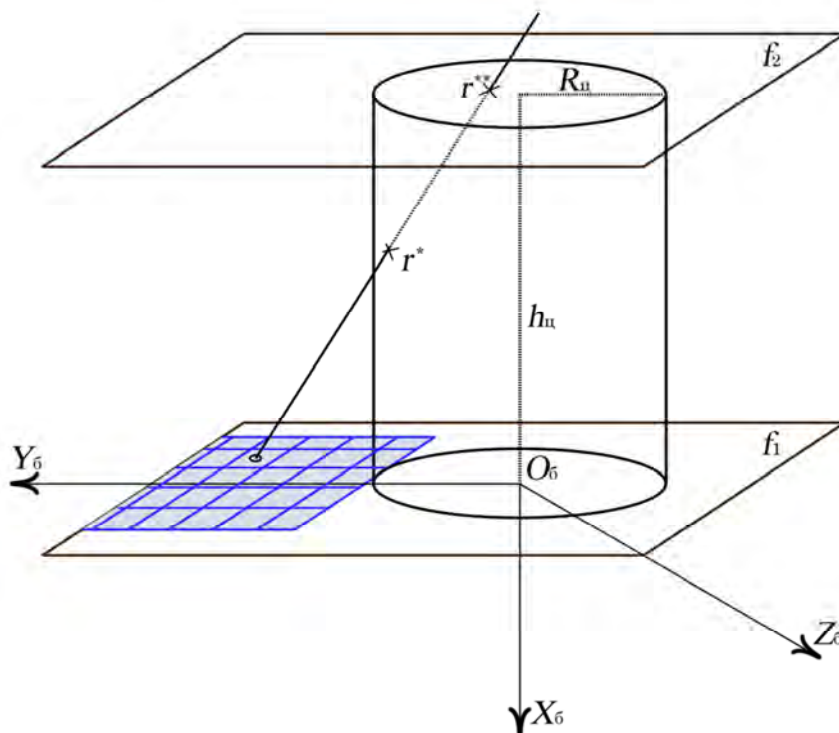


Рис. 2. Иллюстрация расчета затенения по методу трассировки лучей

Тогда система уравнений рабочих плоскостей f_1, f_2 и окружности на цилиндрической поверхности элемента конструкции КА будет выглядеть следующими образом:

$$\begin{cases} A_1 x + B_1 y + C_1 z + D_1 = 0; \\ A_2 x + B_2 y + C_2 z + D_2 = 0; \\ y_{\text{ц}}^2 + z_{\text{ц}}^2 = R_{\text{ц}}^2. \end{cases}$$

Здесь $A_1 = z_{\text{ц}} - z_{\text{КА}}$;

$B_1 = y_{\text{КА}} - y_{\text{ц}}$;

$C_1 = 0$;

$D_1 = y_{\text{КА}}(z_{\text{КА}} - z_{\text{ц}}) + z_{\text{КА}}(y_{\text{ц}} - y_{\text{КА}})$;

$$A_2 = x_C - x_{KA};$$

$$B_2 = 0;$$

$$C_2 = y_{KA} - y_C;$$

$$D_2 = y_{KA}(x_{KA} - x_C) + x_{KA}(y_C - y_{KA}),$$

при этом x_C, y_C, z_C – координаты центра Солнца в АГЭСК;

x_{KA}, y_{KA}, z_{KA} – координаты центра сегмента СБ в АГЭСК;

$y_{\text{ц}}, z_{\text{ц}}$ – координаты основания цилиндра в АГЭСК.

Также введем в рассмотрение следующие величины:

$$p_1 = \frac{B_1 C_1 - B_2 C_1}{A_1 B_1 - A_2 B_1};$$

$$q_1 = \frac{B_1 C_2 - B_2 C_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1};$$

$$p_2 = \frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{A_2 B_1 - A_1 B_1};$$

$$q_2 = \frac{A_1 D_2 - A_2 D_1}{A_2 B_1 - A_1 B_2};$$

$$i = p_1^2 + p_2^2;$$

$$j = 2(p_1 q_1 + p_2 q_2);$$

$$k = q_1^2 + q_2^2 - R_{\text{ц}}^2.$$

Далее производится проверка на принадлежность точек прямой и фигуры, ограниченной поверхностью:

$$\text{discr} = j^2 - 4 \cdot i \cdot k.$$

Если discr меньше нуля, то пересечения прямой и фигуры ограниченной поверхностью нет. Сегмент СБ, через который проходила прямая от центра масс Солнца, считается освещенным.

Если discr равен нулю, то это значит, что, возможно, имеется одна точка пересечения, координаты которой вычисляются по следующим формулам:

$$z = -\frac{j}{2 \cdot i};$$

$$x = zp_1 + q_1;$$

$$y = zp_2 + q_2.$$

Для точного определения пересечения необходимо провести проверку на принадлежность точки пересечения пространству, ограниченному плоскостями f_1 и f_2 . Это производится путем сравнения координаты точки пересечения z и высоты $h_{\text{ц}}$: если $z < h_{\text{ц}}$ и $z > f_1$, то это значит, что данная точка принадлежит пространству возвышающегося над плоскостью СБ элемента конструкции, и элемент СБ считается затененным.

Если discr больше нуля, то возможны две точки пересечения, координаты которых вычисляются по следующим формулам:

$$z_{1,2} = \frac{-j \pm \sqrt{j^2 - 4ik}}{2i};$$

$$x_{1,2} = z_{1,2} p_1 + q_1;$$

$$y_{1,2} = z_{1,2} p_2 + q_2.$$

Точная проверка принадлежности точек пересечения пространству ограниченному плоскостями f_1 и f_2 производится аналогично случаю, когда discr равен нулю, описанному выше.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧАСТИЧНОГО ЗАТЕНЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ СБ РАЗЛИЧНЫМИ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ

С учетом рассмотренной выше реализации многостворчатой СБ в ходе исследований был создан программный комплекс, с помощью которого был осуществлен сравнительный анализ двух методов моделирования частичного затенения элементов конструкции такой СБ.

Для моделирования процесса затенения были использованы известная среда Autodesk 3ds Max Design 2015 и разработанный авторами программный комплекс. Сравнение результатов их применения (рис. 3 и рис. 4) показывает расхождение в результатах, не превышающее 2%.

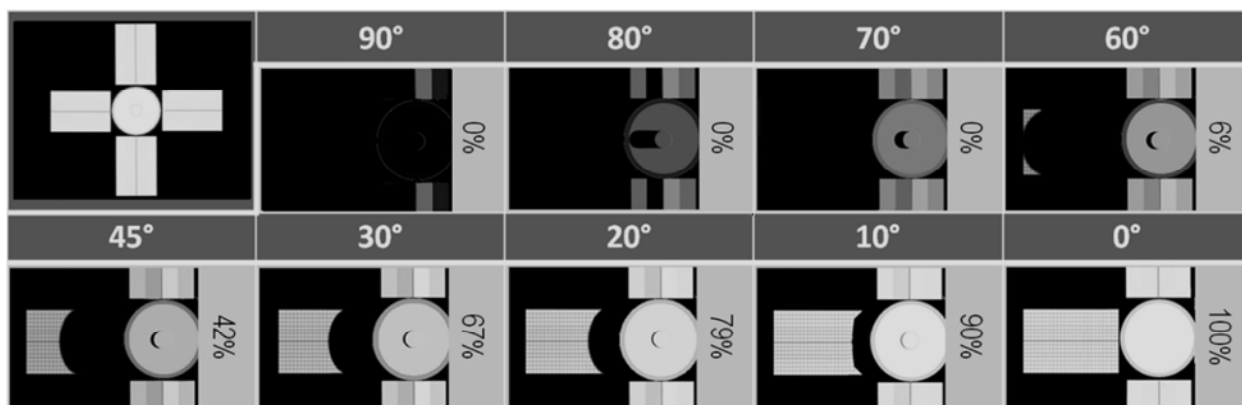


Рис. 3. Результаты применения метода трассировки для моделирования частичного затенения панелей СБ программой Autodesk 3ds Max Design 2015

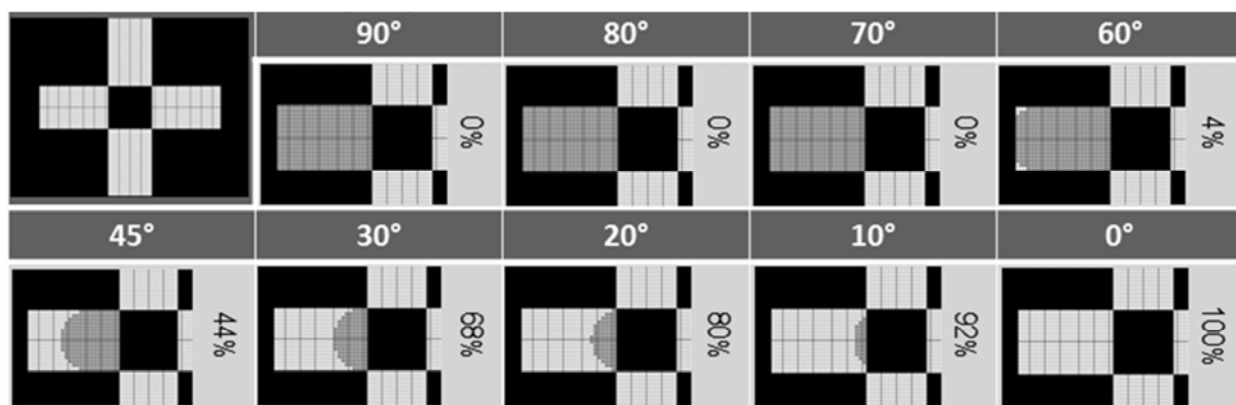


Рис. 4. Результаты сравнительного анализа моделирования частичного затенения панелей СБ разработанным программным комплексом в среде Delphi 2017

На рис. 5 представлены результаты оценивания степени частичного затенения ПСБ, рассчитанных обоими программными средствами для типовых случаев углового положения КА относительно Солнца. Для сравнения на этом же рисунке представлены результаты натурного эксперимента по оцениванию частичного затенения ПСБ. Натуральный эксперимент заключался в создании модели с геометрическими пропорциями заданного КА ДЗЗ и освещение этой модели источником света под различными углами к нормали ПСБ (модель была представлена в качестве экспоната на выставке Научно-технического творчества академии в 2018 году). Сравнение методов моделирования, представленное на рис. 5, позволяет сделать вывод, что результаты, рассчитанные предложенным программным комплексом, имеют расхождение с двумя другими методами не более 2%.

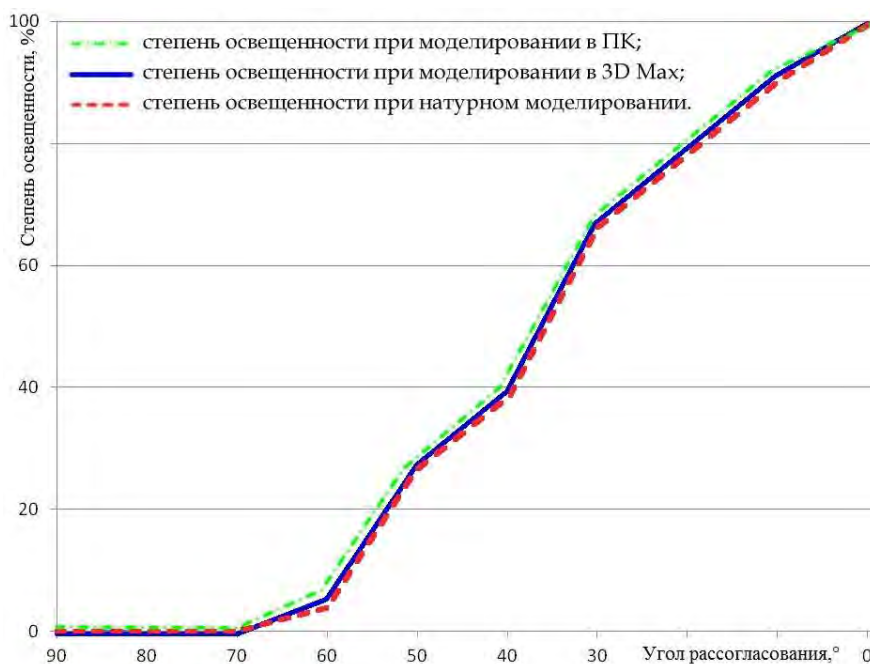


Рис. 5. Сравнение методов геометрического моделирования частичного затенения панелей СБ

С помощью разработанного программного комплекса основанного на описанных выше моделях были проведен первичный количественный анализ геометрии частичного затенения ПСБ КА.

На рис. 6 представлен анализ степени частичного затенения панелей солнечных батарей КА заданной геометрической конфигурации с параметрами орбиты: высота – 1000 км, наклонение – 90° , тип – околокруговая. Период моделирования равен периоду замыкания трассы полета КА.

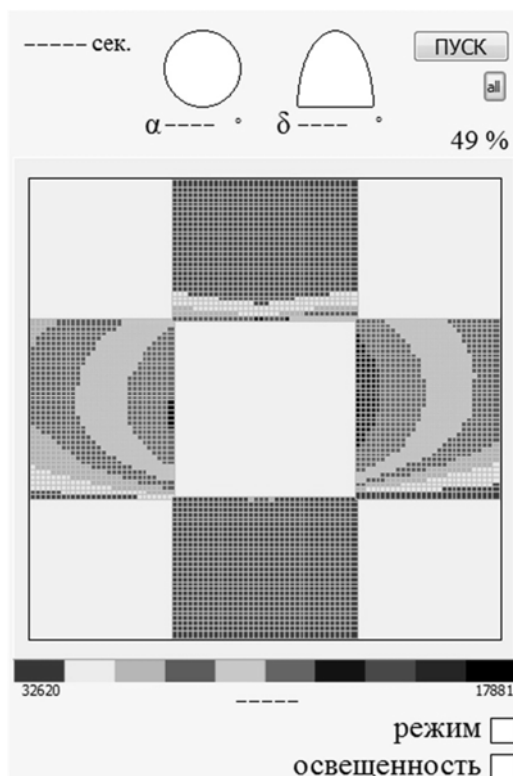


Рис. 6. Геометрия изменения областей частичного затенения ПСБ за весь период моделирования

Представленные результаты позволяют оценить степень частичного затенения ПСБ за период моделирования (для представленного варианта расчета она составляет 51% за период моделирования), что позволяет рассчитать количество полученной электрической энергии за этот период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика позволяет рассчитывать степень частичного затенения панелей солнечных батарей элементами конструкции космического аппарата дистанционного зондирования Земли при известных размерах фотоэлектрических преобразователей, панелей солнечной батарей и формы геометрического построения КА. Достоверность полученных результатов проверена сравнением с известными методами моделирования частичного затенения элементов конструкции конкретной реализации КА.

Список используемых источников

1. Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А. Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса: учеб. пособие. – Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2007. – 160 с.
2. Методика размещения внешних устройств космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом целевого функционирования / Р.Н. Ахметов, Л.Б. Шилов, В.И. Куренков, А.А. Якищук // Вестник СамГУ. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – Самара: СамГУ, 2015. – Т. 4, № 4. – С. 38–48.
3. Баллистико-навигационное обеспечение космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Ресурс-ДК» / Г.П. Аншаков, А.И. Мантуров, Я.А. Мостовой // Сб. тр. конф. «Вопросы баллистики». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. – С. 16–36.
4. Модель энергопритока от солнечных батарей БСЭС КА стабилизированного вращением / Ю.А. Чудновский, Д.Л. Каргу, Н.В. Радионов и др. // Тр. Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 659. – С. 164–171.
5. Шилов Л.Б. Моделирование неориентированного полета космического аппарата для оценки среднесуточной мощности солнечной батареи с панелями различной плотности и ориентации // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. – Казань, 2013. – Т. 18, № 2 (37). – С. 101–115

Ю.А. Гравченко,
кандидат техн. наук, доцент;
Б.К. Гранкин,
доктор техн. наук, профессор;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
Г.И. Кудрявцев,
кандидат экономических наук
АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг», г. Ижевск;
С.В. Чирва,
кандидат техн. наук

КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Обосновывается актуальность внедрения адаптивного управления жизненным циклом объектов ракетно-космической техники. Предлагается решать задачи адаптивного управления жизненным циклом объектов ракетно-космической техники с использованием средств автоматизации поддержки принятия решений при последовательном и поэтапном внедрении технологий искусственного интеллекта.

Выполнен анализ системы межгосударственных стандартов в области управления жизненным циклом продукции военного назначения. Для объектов ракетно-космической техники выявлена противоречивая ситуация, выраженная в том, что, с одной стороны, существует объективная необходимость оперативного принятия решения на устранение отказа на объекте ракетно-космической техники в нестандартных состояниях, с другой стороны, возможности систем мониторинга технического состояния этих объектов ограничены, что в целом требует повышения информационных возможностей систем эксплуатации объектов ракетно-космической техники по своевременному обнаружению нестандартных состояний, прогнозированию их последствий и принятию решения на управление. Решение этих задач предлагается возложить на системы поддержки принятия решений.

В качестве составной части систем поддержки принятия решений предложен комплекс моделей субъектов эксплуатации. Он формируется в виде взаимосвязанных моделей персонала эксплуатирующих организаций, структуры этих организаций, алгоритмов выработки решений на управление функционированием объектов ракетно-космической техники, алгоритмов контроля эксплуатационных процессов и действий персонала, алгоритмов обеспечения безопасности и алгоритмов взаимодействия с единой информационной средой.

Ключевые слова: жизненный цикл, управление жизненным циклом, системная концепция, объекты ракетно-космической техники, нестандартная ситуация, единая информационная среда.

ВВЕДЕНИЕ

Части запуска и управления космическими аппаратами (КА) Космических войск (КВ) Воздушно-космических сил (ВКС) выполняют широкий спектр технологических операций с объектами ракетно-космической техники (РКТ): техническое обслуживание наземного технологического оборудования (НТО) и летательных аппаратов, транспортировка элементов ракет космического назначения (РКН) на космодромы, автономные испытания элементов РКН, сборка РКН как единого агрегата, комплексные испытания, транспортировка РКН на стартовый комплекс (СК), установка РКН в стартовую систему, пуск РКН, управление КА, обеспечение реализации целевого предназначения КА. Численность обслуживающего персонала, выполняющего указанные операции, может составлять от 100 до 1000 специалистов разного профиля, подготовки и квалификации.

Содержание и последовательность всей совокупности операций технологического процесса излагают в инструкции по эксплуатации (ИЭ) и в сетевом технологическом графике,

предусматривающем резервы времени на устранение неизбежных (ожидаемых) отказов (неисправностей), выявляемых в процессе работ каждого вида оборудования. Традиционно вопросы планирования и контроля работ, поиска и устранения неисправностей решаются специалистами КВ с минимальным привлечением автоматизированных систем информационного обеспечения (интеллектуальных систем) эксплуатации РКТ. Это связано с тем, что эксплуатируемые в настоящее время ракетно-космические комплексы (РКК) («Союз», «Рокот», «Ангара») создавались в периоды, когда уровень информатизации перспективных высокотехнологичных отраслей экономики был сравнительно невысок.

Между тем, важным аспектом, указывающим на необходимость информатизации процессов эксплуатации агрегатов и систем объектов РКТ, является то, что в состав этих объектов входят физически разнородные системы (компоненты), которые взаимодействуют при совместном функционировании:

- механические (механизмы);
- гидравлические;
- электрические;
- пневматические.

Рассматриваемые системы представляют собой человеко-машинные комплексы, обладающие всеми свойствами сложных технических систем – объектов исследования в системотехнике [1], и характеризуются разнообразием предъявляемых к ним требований, сложностью и неоднородностью состава, многообразием операций, разнообразием связей между ними.

Процесс эксплуатации объектов РКТ достаточно сложен из-за значительных масс и габаритов, высотности и энергонасыщенности объектов РКТ, наличия на них компонентов ракетного топлива, необходимости присутствия личного состава на агрегатах независимо от уровня автоматизации.

Наряду со свойствами традиционных объектов системотехники – сложных информационно-управляющих систем, рассматриваемым агрегатам присущи специфические черты, которые являются существенными при анализе функционирования агрегатов в нештатных состояниях и оправдывают их выделение в особый класс сложных систем:

1. Специфика объектов РКТ военного назначения обуславливает принципиально отличные требования к оперативности функционирования по сравнению с требованиями к объектам РКТ коммерческого назначения. Если задержки работ, вызванные отказами элементов в последних, ведут только к переносу сроков и корректировке программ пусков, то для агрегатов военного назначения это приводит к срыву выполнения боевой задачи. Таким образом, работы ведутся постоянно в условиях строгой технологической регламентации и дефицита времени.

2. Условия боевого применения РКТ в период нарастания угрозы военной агрессии требуют проведения массовых пусков ракет в ограниченные сроки. Это принципиально меняет требования к обеспечивающим системам, делает их такими же жесткими, как и требования к целевым системам (по надежности, оперативности, безопасности, уровню автоматизации управления и т. д.).

3. Многообразие режимов совместного функционирования разнородных компонент объектов РКТ связано с большим числом его возможных состояний, а в реальных условиях эксплуатации – с потенциальным переходом в нештатные состояния, что зачастую приводит не только к невыполнению целевой задачи, но и к разрушению агрегатов, выходу из строя агрегатов и объектов РКТ, гибели и травматизму личного состава боевых расчетов (ЛС БР), нанесению ущерба сопрягаемым объектам и окружающей природной среде.

4. Наличие интенсивных потоков обмена (вещественного, энергетического, информационного) между компонентами агрегатов объектов РКТ, агрегатами и внешней средой, а также внутри каждой из компонент порождает проблему обеспечения безаварийности и безопасности. Поэтому к агрегатам предъявляются особо жесткие требования по надежности, контролю, диагностике и безопасности.

5. Эргатический характер функционирования объектов РКТ определяет возможность их перехода в состояние, при которых возможно нанесение вреда здоровью ЛС БР, материальным ценностям и окружающей природной среде по различным группам причин: из-за отказа технических устройств и (или) ошибок ЛС БР.

Вместе с тем, учитывая современные тенденции в сфере разработки, создания и эксплуатации новых видов вооружений, в том числе средств выведения КА, следует отметить следующее:

1. Время, необходимое на разработку и внедрение новых образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) сокращается, что обусловлено в том числе внедрением информационных технологий (ИТ) в процесс их разработки.

2. Сроки эксплуатации новых образцов ВВСТ, вероятнее всего, будут сокращаться, что будет выражаться в замене (модернизации) эксплуатируемых образцов новыми еще до истечения ими назначенного ресурса.

3. Номенклатура систем ВВСТ (а возможно, и объектов РКТ) будет становиться все более широкой, количество задач, решаемых с их помощью, будет расширяться.

4. ИТ все шире проникают во все отрасли экономики. В том числе они внедряются и для сопровождения жизненного цикла (ЖЦ) ВВСТ. Свое применение находят компьютерные модели эксплуатационных процессов и агрегатов ВВСТ, базы данных, электронный документооборот и т. д.

Учитывая перечисленные тенденции в сфере разработки, создания и эксплуатации новых видов вооружений, а также особенности разработки, создания и эксплуатации систем РКТ, можно предположить, что решение задач управления ЖЦ объектов РКТ целесообразно проводить с использованием средств автоматизации поддержки принятия решений при последовательном и поэтапном внедрении технологий искусственного интеллекта (ИИ), т. е. на основе использования концепции адаптивного управления ЖЦ объектов РКТ.

ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ КОНЦЕПЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Организации, эксплуатирующие ракетно-космическую технику в условиях РКК, также можно рассматривать как предприятия, выполняющие завершение технологического цикла сборки и проверки РКН с их последующим запуском в интересах МО РФ или других организаций. Совокупность технологических операций, описанных в предыдущем разделе, можно рассматривать как часть производственного процесса, направленного на предоставление космических услуг потребителю. Для решения задач информационного обеспечения процессов производства высокотехнологичной продукции с 80-х годов прошлого века в технологически развитых отраслях экономики применяются CALS-технологии, осуществляющие непрерывную информационную поддержку поставок и жизненного цикла изделий. Считается, что вне указанных технологий успех на рынках сложной технической продукции недостижим [2].

Однако следует отметить, что CALS-технологии рассматриваются, прежде всего, как автоматизированные системы электронного описания всех этапов проектирования, производства и эксплуатации высокотехнологичной продукции. Вопросы поддержки принятия решений в условиях нештатных ситуаций в рамках указанных технологий не рассматриваются, как и вопросы организации и обеспечения функционирования сложных технических систем, имеющих эргатический характер функционирования.

Это свидетельствует о необходимости специальной организации деятельности предприятий ракетно-космической отрасли в целом и частей запуска и управления КА в частности. Решение этой задачи целесообразно выполнять с использованием новых подходов к развитию методологии научного обоснования концепций управления и планирования эксплуатации объектов РКТ.

Под методологией понимается система организации теоретической и практической деятельности по созданию и эксплуатации современных сложных объектов РКТ. К такому типу объектов можно отнести организации, эксплуатирующие РКТ, и собственно агрегаты и системы РКТ.

Для исследования процессов адаптивного управления ЖЦ объектов РКТ на основе междисциплинарных методологических принципов необходим специальный подход, объединяющий конкретизированные положения общей методологии (принципы классификации и моделирования), частных методологий (специальная системная концепция, принципы декомпозиции и агрегирования, методы синтеза и анализа) и конкретных методик (специальная терминология, процедуры и алгоритмы обоснования требований, синтеза и анализа), учитывающих особенности уникальных объектов исследования.

Такая специализированная методология должна содержать следующие компоненты:

- 1) конструктивные определения и трактовки базовых терминов;
- 2) унифицированную для класса объектов исследования системную концепцию;
- 3) методологические принципы моделирования, декомпозиции и агрегирования, синтеза и анализа исследуемых объектов и процессов их эксплуатации;
- 4) методологические принципы моделирования, синтеза и анализа базовых алгоритмов адаптивного управления ЖЦ исследуемых объектов.

БАЗОВЫЕ ТЕРМИНЫ КОНЦЕПЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ИХ ТРАКТОВКИ

В соответствии с ГОСТ Р 56135–2014 [3] под управлением ЖЦ продукции военного назначения (ПВН) понимается часть деятельности в области разработки, производства, обеспечения эксплуатации, ремонта и утилизации ПВН, связанная с обеспечением заданных требований к ПВН на основе поэтапного планирования и контроля соответствия ПВН заданным требованиям на стадиях разработки, производства и эксплуатации, а также поддержанием такого соответствия требованиям на стадии эксплуатации путем управляемого воздействия на конструкцию образцов ПВН, производственную среду и систему технической эксплуатации.

Кроме определений в области управления ЖЦ ГОСТ устанавливает перечни основных положений в области управления эксплуатацией ПВН, порядка управления жизненным циклом, функций управления жизненным циклом и другие аспекты управления ЖЦ. Важным моментом является то, что в качестве одной из функций управления ЖЦ изделий ПВН указывается информационная поддержка ЖЦ. Однако ее предназначением в соответствии с указанным ГОСТом, является обеспечение эффективного взаимодействия субъектов управления ЖЦ ПВН. Вопросы управления сложными системами вооружений в боевой обстановке (в условиях возникающих отказов), т.е. решения задач поддержки принятия решений, не рассматриваются.

Однако, в подпункте 5.2.8 ГОСТ Р 56135–2014 [3] в качестве элемента организации работ по управлению ЖЦ образца ПВН упоминается «программа информационной поддержки процессов ЖЦ», в качестве исполнителей работ при реализации функций управления ЖЦ определены «Головной исполнитель, исполнители, эксплуатанты, военное представительство (Минобороны России)», а в качестве результата определена «Интегрированная единая информационная среда (ЕИС) субъектов ЖЦ».

Между тем, в ГОСТ Р 56111–2014 [4] даны термины «особая ситуация из-за отказа» (failure condition) и «эксплуатационное происшествие» (accident). Термин «особая ситуация из-за отказа» определяется как «ситуация, возникшая в процессе применения образца по назначению вследствие отказа или сочетания отказов и оказывающая влияние на условия завершения данного цикла применения образца».

Для космических систем и комплексов в ГОСТ Р 56516–2015 [5] термин «нештатная ситуация» определен как «состояние системы эксплуатации, характеризующееся любым отклонением от заданной (штатной) программы эксплуатации космического комплекса, его составных частей, вызванное ошибками и несанкционированными действиями обслуживающего персонала, повреждениями и отказами техники, отклонениями параметров внешней среды от расчетных значений, потенциально способными привести к возникновению опасности и аварийной ситуации». При этом термин содержит примечание: «если штатная ситуация не будет своевременно устранена, то она приводит к возникновению либо аварийной, либо опасной ситуации».

Таким образом, можно сделать вывод, что для ПВН целесообразно разрабатывать методики, позволяющие устранять штатные ситуации как можно быстрее. Это соответствует требованиям ГОСТов [3–6] и позволяет говорить о необходимости разработки систем адаптивного управления жизненным циклом объектов ракетно-космической техники, т. е. ЕИС субъектов ЖЦ, включающую в себя совокупность систем поддержки принятия решений (СППР) для управления сложными системами вооружений в боевой обстановке (в условиях возникающих отказов).

В целом терминология, предложенная системой стандартов, в части, касающейся управления ЖЦ ПВН, может стать основой для описания концепции адаптивного управления ЖЦ объектов РКТ. Следует обратить внимание на противоречивую ситуацию в области управления ЖЦ объектов РКТ, возникшую вследствие изменения нормативной документации и дальнейшего совершенствования РКТ в целом. С одной стороны, существует объективная необходимость оперативного принятия решения на устранение отказа на объекте РКТ в штатных состояниях, с другой стороны, возможности систем мониторинга технического состояния этих объектов весьма ограничены из-за отсутствия научно-методического аппарата исследований штатных состояний, по результатам которых можно было бы принимать решения на управление агрегатами и системами объектов РКТ в штатных ситуациях, в условиях жесткой технологической регламентации и лимита времени, что в целом требует повышения информационных возможностей систем эксплуатации объектов РКТ по своевременному обнаружению штатных состояний, прогнозированию их последствий и принятию решения на управление.

СИСТЕМНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Задача анализа штатного функционирования агрегатов и систем объектов РКТ как сложных объектов контроля и управления вызывает необходимость их разделения на части, называемое декомпозицией, позволяющей описывать объект исследования на разных уровнях детализации, определять свойства целого из свойств его частей и требования к частям из требований к целому. Достижение целей декомпозиции агрегатов и систем объектов РКТ обеспечивается применением совокупности принципов, условно называемых принципами **функциональности, полноты, разбиения, сохранения связей и останова** [1].

В ходе системных исследований процессов эксплуатации сложных объектов, какими являются агрегаты и системы объектов РКТ, возникает необходимость решения задач агрегирования. Конечная цель агрегирования при моделировании и анализе функционирования агрегатов и систем объектов РКТ в штатных состояниях состоит в получении моделей систем (операционных систем), в рамках которых может быть проведен анализ штатных ситуаций, возникающих при переходе исследуемого объекта (системы, агрегата, комплекса) в штатные состояния. При агрегировании, как и при декомпозиции, должны соблюдаться принципы межуровневых переходов, т. е. принципы **функциональности, полноты, сохранения связей и останова** [1].

Решение задач анализа и синтеза нештатного функционирования агрегатов и систем объектов РКТ целесообразно проводить на основе **структурно-функционального** подхода [1]. Он должен являться исходным этапом исследования и включать в себя задачи математического описания структурно-функциональных свойств, анализ структуры и алгоритмов функционирования агрегата. Специфика структурно-функционального подхода состоит в его универсальности, дискретном характере формальных моделей и алгоритмов анализа.

Основные допущения, отражающие специфику структурно-функционального подхода к анализу функционирования агрегатов и систем объектов РКТ в нештатных состояниях и применяющиеся при их моделировании, состоят в следующем [1]:

1. В соответствии с принятой концепцией управляющей системы (УС), каждый агрегат, компонента агрегата и элемент компоненты является одновременно УС для элементов следующего уровня детализации и объектом управления (ОУ) для элементов более высокого уровня детализации. Поэтому агрегатам, компонентам агрегатов и их элементам как ОУ соответствует обусловленное их функционированием множество (пространство) $Z_{\{\zeta\}} = \{U_{\{i\}}, \Omega_{\{j\}}, T_{\{t\}}\}$ дискретных состояний, образованное множеством $U_{\{i\}}$ положений в системном пространстве, множеством $\Omega_{\{j\}}$ их параметров и множеством $T_{\{t\}}$ дискретных моментов времени. Это допущение обусловлено дискретностью структуры рассматриваемых объектов и команд управления.

2. Агрегаты, компоненты агрегатов и их элементы функционируют в дискретном (тактовом) времени (дискретность определяется тактами функционирования УС); переходы УС и ОУ из одного состояния в другое считаются мгновенными, а процессы являются квазистационарными. Это допущение отражает специфику структурно-функционального этапа, особенности процессов функционирования агрегатов, в которых преобладают установившиеся процессы, а переходные процессы быстротечны и имеют характер переключения исполнительных органов. Исследование переходных режимов проводится на параметрическом этапе при заданной структуре и алгоритмах управления.

3. Как следствие дискретного описания ОУ элементы УС, имея конечное число входов, выходов и различных состояний, способны выполнять конечное число преобразований ОУ.

4. Специфика отказов или нештатных срабатываний элементов учитывается при их описании, т. е. элементы рассматриваются с единых системных позиций как системы, обладающие соответствующими функциональными свойствами и переходящие в нештатные состояния в произвольном такте функционирования при отказе или нештатном срабатывании, из которых их можно вывести в штатное или безопасное состояния используя функциональные свойства.

5. УС подвержены воздействиям случайного характера (со стороны окружающей среды, произвольных команд управления УС более высокого уровня детализации), вследствие чего в произвольном такте функционирования из УС могут исключаться элементы с образованием соответствующего числа входов и выходов, а также могут выдаваться произвольные команды управления, что отражает отказы и ошибки средств принятия решения УС.

6. ОУ при определенных условиях может произвольно переходить в другое состояние (например, расслоение компонентов ракетного топлива, повышение давления газа вследствие нагрева и т. д.). Это допущение отражает воздействие со стороны окружающей среды или связанное с внутренними причинами, отражающими свойства самого ОУ как энергетически насыщенного объекта.

Допущения, связанные с дискретным представлением элементов УС, ОУ и времени, снимаются при переходе к следующему (параметрическому) этапу исследования. Вместе с тем, модели, полученные на структурно-функциональном этапе, являются необходимыми и исходными для параметрического этапа, так как описывают связи параметров элементов, систематизируют все многообразие непрерывных процессов, реализующихся в каждом из состояний и переходов УС и ОУ [1].

Конструктивная реализация принципов системного подхода, декомпозиции и агрегирования при анализе функционирования агрегатов и систем объектов РКТ в нештатных состояниях предполагает наличие комплекса алгоритмически взаимосвязанных по горизонтали и вертикали моделей (элементов, структур, операций и алгоритмов функционирования), описывающих функциональные свойства агрегатов и систем на различных уровнях детализации [1]. Это позволяет осуществлять математически строгие «межмодельные» переходы в пределах одного уровня иерархии и «межуровневые» переходы. Переходы между смежными уровнями имеют своей целью согласование функциональных свойств элементов соответствующих уровней и образуют логическую основу формализованных процедур декомпозиции и агрегирования, т. е. объединения элементов в систему.

Для математического описания элементов, структур, операций и алгоритмов функционирования агрегатов и систем объектов РКТ, включающих в свой состав физически разнородные компоненты, наиболее подходящим являются использование математических моделей, формирующихся на основе теорий графов, математической логики и конечных автоматов.

Отличительной чертой алгоритмического подхода [1] является то, что переходы между моделями реализуются в виде алгоритмов, а получаемая в итоге модель агрегата (системы) объекта РКТ создается в виде алгоритма (алгоритмической модели), который используют далее в качестве объекта исследования. Основой для построения алгоритмической модели агрегата для анализа функционирования в нештатных состояниях служит концептуальное описание агрегата, элементов агрегата и их функциональных свойств, для исследования которых и строится данная модель.

Указанный подход вполне реализуем и при проведении исследований в сфере управления ЖЦ объектов РКТ. В соответствии с ГОСТ Р 56135–2014 [3] для целей управления ЖЦ используют его общую модель (с разновидностями такой модели, при необходимости), формализующую последовательность и временные рамки процессов, необходимых для реализации ЖЦ, обеспечения и контроля характеристик задаваемой, проектируемой, изготавливаемой и эксплуатируемой ПВН. Указанная модель рассматривает ЖЦ ПВН как цикл существования объекта ЖЦ от замысла до утилизации с возможностью воспроизводства элементов объекта ЖЦ.

Модель ЖЦ отражает два взаимосвязанных цикла: 1) цикл существования типовой конструкции образца ПВН, включающий формирование типовой конструкции образца ПВН, использование типовой конструкции (конструкторской документации (КД) и данных) для производства, сопровождение описания типовой конструкции, в ходе серийного производства, архивирование (или уничтожение) КД и данных при прекращении выпуска; 2) цикл существования серийного экземпляра ПВН, включающий изготовление экземпляра продукции, отвечающего эталону его типовой конструкции, передачу заинтересованному пользователю и практическое применение (включая его техническое обслуживание и ремонт), списание и утилизацию данного экземпляра ПВН. Схема управления жизненным циклом ПВН представлена на рис. 1 (ГОСТ Р 56135–2014 [2]).

Следует отметить, что ЕИС программы не подразумевает наличия алгоритмов поддержки принятия решений. Однако компонент схемы управления ЖЦ – «Информационная поддержка ЖЦ» может содержать комплекс математических моделей, позволяющий при их применении осуществлять поддержку принятия решений как в штатных, так и в нештатных условиях функционирования объектов РКТ.

На рис. 2 представлен фрагмент схемы ЕИС, включающий комплекс алгоритмически взаимосвязанных математических моделей элементов, структур, операций, алгоритмов функционирования агрегатов (систем) объектов РКТ и СППР. На основе комплекса математических моделей выполняется анализ нештатного функционирования агрегатов (систем) объектов РКТ. Варианты решений на управление ими формируются СППР. Комплекс на рис. 2 включает в себя следующие компоненты [1]:

- модели элементов в штатных (M_{11}^2) и нештатных (M_{21}^2) состояниях в виде операторов преобразования параметров материальных потоков в элементах в штатных и нештатных состояниях;
- модели структур компонент агрегата в штатных (M_{12}^2) и нештатных (M_{22}^2) состояниях, описывающие состав и связи между элементами в штатных и нештатных состояниях;

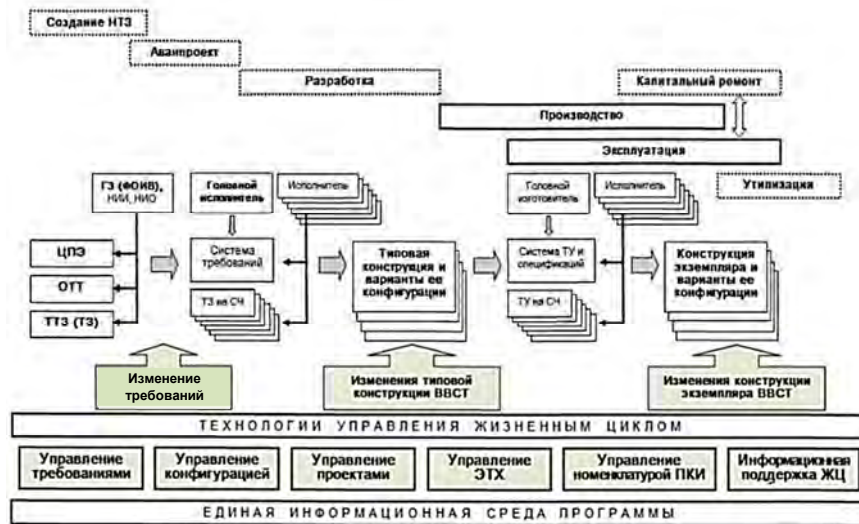


Рис. 1. Схема управления жизненным циклом ПВН:

ЦПЭ – целевой показатель эффективности; ОТТ – общетехнические требования;
 ТТЗ (ТЗ) – тактико-техническое задание (техническое задание);
 ЭТХ – эксплуатационно-технические характеристики; ТУ – технические условия;
 СЧ – составная часть; ГЗ (ФОВ) – государственный заказчик
 (федеральный орган исполнительной власти)

- модели операций компонент агрегата в штатных (M_{13}^2) и нештатных (M_{23}^2) состояниях, отражающие распределение и преобразование параметров материальных потоков в компоненте в штатных и нештатных состояниях;
- модели алгоритмов функционирования компонент агрегата в штатных (M_{14}^2) и нештатных (M_{24}^2) состояниях, описывающие последовательность переходов компоненты из состояния в состояние при ее функционировании в штатных и нештатных состояниях;
- модель структуры агрегата в штатных (M_{11}^1) и нештатных (M_{21}^1) состояниях, описывающая состав и связи между компонентами в штатных и нештатных состояниях;
- модель операций агрегата в штатных (M_{12}^1) и нештатных (M_{22}^1) состояниях, отражающая распределение и преобразование параметров материальных потоков между функциональными элементами (компонентами агрегата) в штатных и нештатных состояниях;
- модель процессов функционирования агрегата в штатных (M_{13}^1) и нештатных (M_{23}^1) состояниях, описывающая последовательность переходов агрегата из состояния в состояние при его функционировании в штатных и нештатных состояниях.

Указанные модели должны являться составной частью интегрированной ЕИС субъектов ЖЦ. Специализированным объектом ЕИС может стать СППР, реализованная в виде аппаратно-программного комплекса. СППР должна быть алгоритмически связана со всеми элементами комплекса математических моделей и базами данных. Базы данных эксплуатационных процессов могут включать как сведения о типовых конструкциях агрегатов и систем объектов РКТ, так и сведения о конструкции экземпляров агрегатов и систем и вариантах их конфигурации, а также другую информацию, необходимую для управления ЖЦ (рис. 1).

По принадлежности к процессам функционирования множество возможных состояний агрегата (системы) объекта РКТ на конкретном такте функционирования можно разделить на два непересекающихся множества штатных и нештатных состояний. Из множества возможных нештатных состояний целесообразно рассматривать нештатные состояния, вызываемые отказами элементов агрегатов. Нештатные состояния агрегата (системы) объекта РКТ по мере наносимого ущерба можно разделить на безопасные, потенциально опасные и опасные.

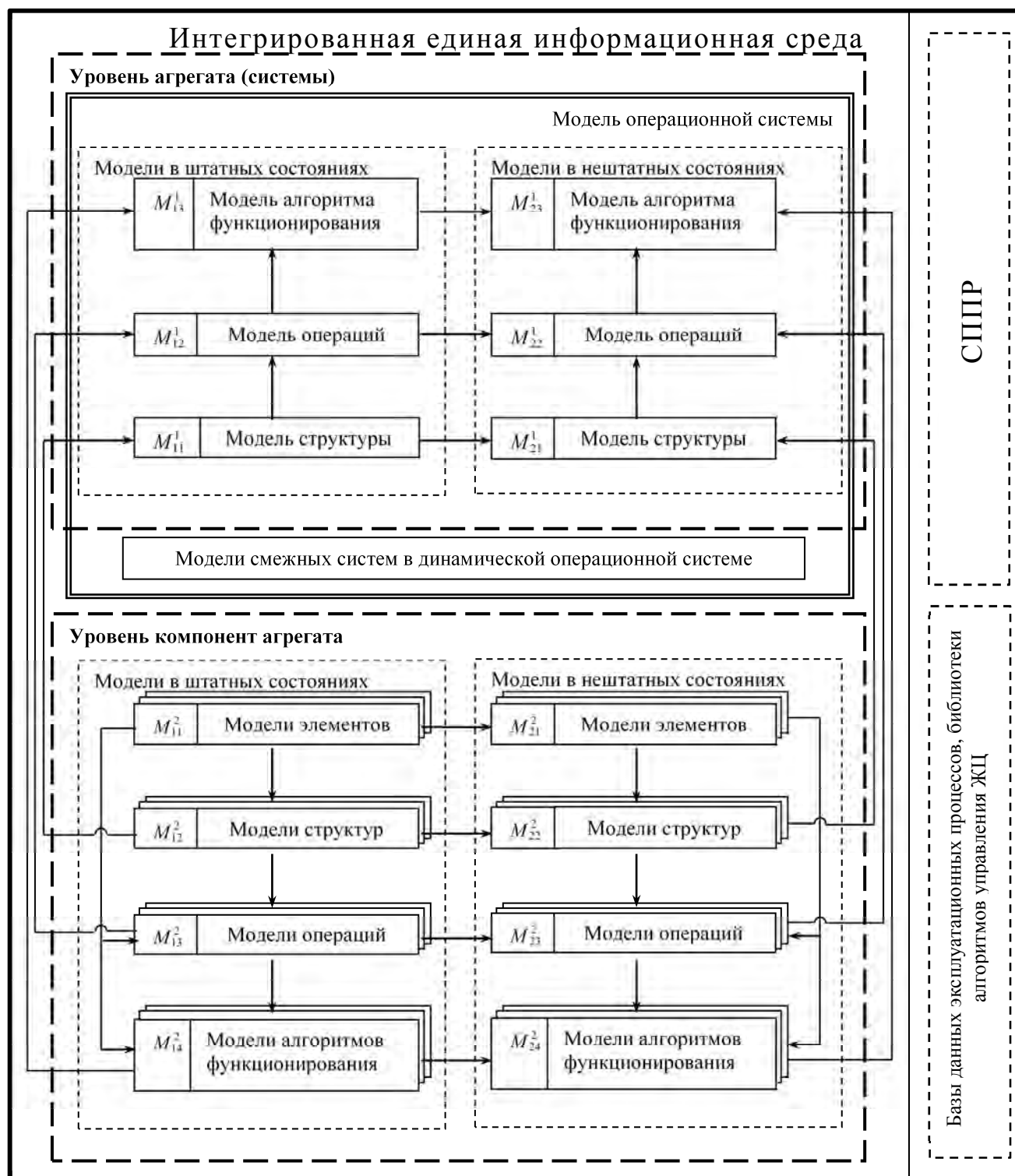


Рис. 2. Фрагмент схемы ЕИС, включающий комплекс алгоритмически взаимосвязанных математических моделей элементов, структур, операций, алгоритмов функционирования агрегатов (систем) объектов РКТ и СППР

На рис. 3 представлена схема комплекса моделей субъектов эксплуатации на основе взаимосвязанных моделей персонала эксплуатирующих организаций, структуры этих организаций, алгоритмов выработки решений на управление функционированием объектов РКТ, алгоритмов контроля эксплуатационных процессов и действий персонала, алгоритмов обеспечения безопасности и алгоритмов взаимодействия с ЕИС.

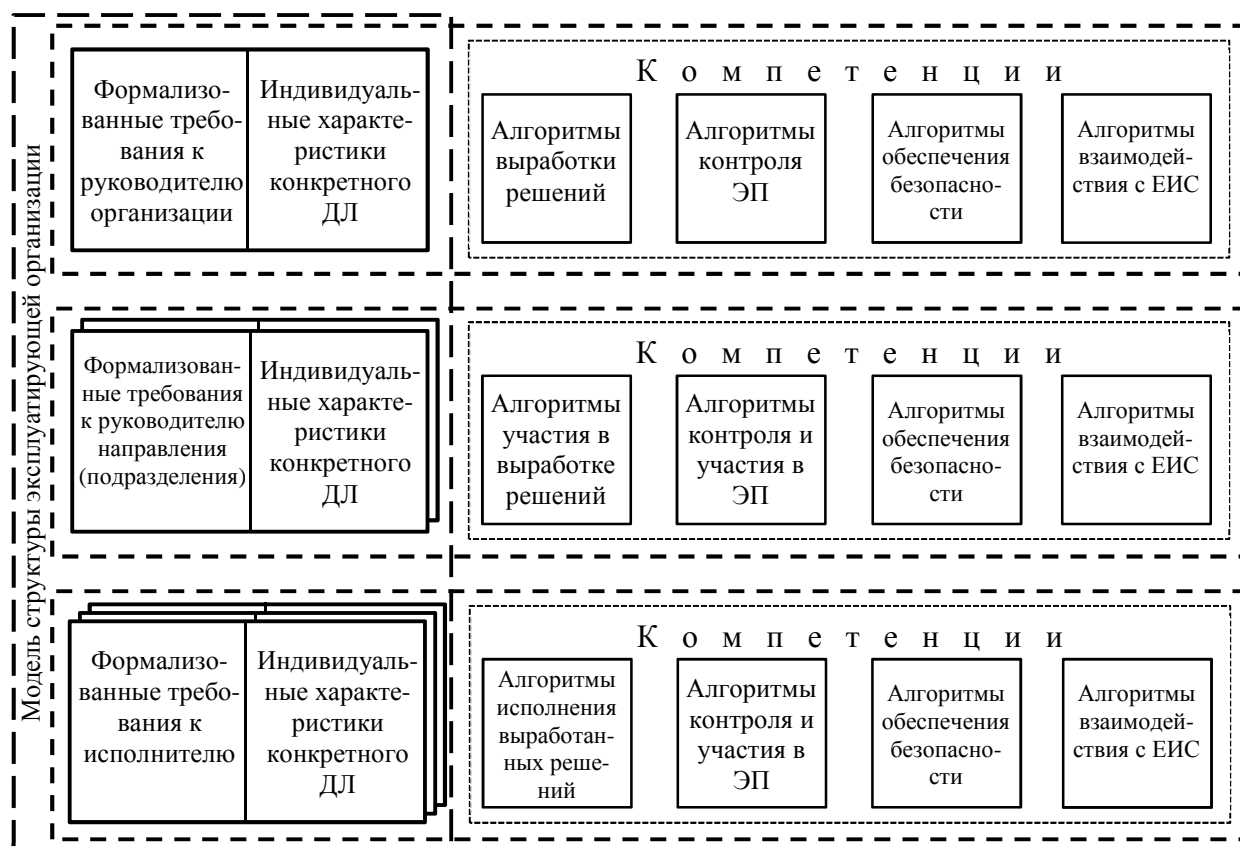


Рис. 3. Комплекс моделей субъектов эксплуатации:
ДЛ – должностное лицо; ЭП – эксплуатационные процессы

Совокупность комплексов предложенных моделей (рис. 3) составляет модель эксплуатирующей организации, т. е. субъекта ЖЦ. Целями формирования подобных моделей могут являться: определение степени профессиональной пригодности должностных лиц или кандидатов на вакансии; формирование специализированного графического интерфейса для должностных лиц, принимающих участие в эксплуатации агрегатов и систем объектов РКТ; определение структуры данных, необходимых для принятия решений на управление агрегатами и системами.

Предложенная модель должна стать неотъемлемой частью СППР и решать в ее составе помимо перечисленных еще и задачи планирования эксплуатации объектов РКТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы адаптивного управления ЖЦ объектов РКТ позволят решать задачи управления ЖЦ объектов РКТ с использованием средств автоматизации поддержки принятия решений при последовательном и поэтапном внедрении технологий ИИ.

Для исследования процессов адаптивного управления ЖЦ объектов РКТ на основе междисциплинарных методологических принципов необходим специальный подход, объединя-

ющий конкретизированные положения общей методологии, частных методологий и конкретных методик, учитывающих особенности уникальных объектов РКТ.

В целом требования, предложенные системой международных стандартов, определяют необходимость развития и внедрения в сферу управления ЖЦ ПВН концепции адаптивного управления ЖЦ объектов РКТ.

Концепция адаптивного управления ЖЦ объектов РКТ должна стать основой для формирования ЕИС субъектов эксплуатации, включающий в свой состав СППР.

Для формирования графического интерфейса для номеров БР ЛС, фильтрации информационного потока, описывающих эксплуатационные процессы, в качестве составной части СППР предложен комплекс моделей субъектов эксплуатации. Он формируется в виде взаимосвязанных моделей персонала эксплуатирующих организаций, структуры этих организаций, алгоритмов выработки решений на управление функционированием объектов РКТ, алгоритмов контроля эксплуатационных процессов и действий персонала, алгоритмов обеспечения безопасности и алгоритмов взаимодействия с ЕИС. Указанный комплекс моделей позволит сформировать варианты действий должностных лиц, необходимых для принятия решений на управление агрегатами и системами.

Список используемых источников

1. *Эбель А.В.* Диссертация на соискание ученой степени на закрытую тему [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 20.02.14: защищена 03.02.2005: утв. 06.09.2005 / Эбель Алексей Вольдемарович. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2003. – 286 с.

2. *Кудрявцев Г.И.* Стратегия развития высокотехнологичного приборостроительного предприятия в условиях цифровой экономики: монография. – М.: Граница, 2017. – 296 с.

3. ГОСТ Р 56135–2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. – Введен впервые 19.09.2014. – М.: Стандартиформ, 2016. – 16 с.

4. ГОСТ Р 56111–2014. Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Номенклатура показателей эксплуатационно-технических характеристик. – Введен впервые 16.09.2014. – М.: Стандартиформ, 2014. – 29 с.

5. ГОСТ Р 56516–2015. Порядок и правила обеспечения контроля надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. – Введен впервые 8.07.2015. – М.: Стандартиформ, 2016. – 27 с.

6. ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2011. – 26 с.

А.П. Демин,
кандидат техн. наук;

Д.С. Ершов
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Москва;

А.В. Кульков
Научно-технический комитет (Метрологической службы ВС РФ), г. Москва

АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПОЛКОВ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ МЕРОПРИЯТИЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЙСК (СИЛ) В УСЛОВИЯХ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ

В работе представлен алгоритм распределения поверочного оборудования метрологических подразделений радиотехнических полков между воинскими подразделениями в условиях осуществления мероприятий метрологического обеспечения войск (сил) в боевых действиях с целью повышения результативности проверки средств измерений военного назначения с учетом значений коэффициентов загруженности поверочного оборудования.

Ключевые слова: метрологическое подразделение, алгоритм принятия решений, метрологическое обеспечение, радиотехнические войска.

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехнические полки (РТП) являются основными разведывательными воинскими подразделениями соединений противовоздушной обороны (ПВО) Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) и предназначены для ведения радиолокационной разведки воздушного противника в целях обеспечения боевых действий зенитных ракетных полков и воинских формирований истребительной авиации. На вооружении РТП стоят подвижные радиолокационные станции разведки, обнаружения и целеуказания различных диапазонов частот, радиовысотомеры, аппаратура радиолокационного опознавания летательных аппаратов, автоматизированные системы управления, средства связи и другая боевая техника. Основными задачами РТП являются: непрерывное наблюдение за воздушным пространством; обнаружение воздушных целей, непрерывное слежение и их сопровождение; своевременная выдача информации на командные пункты и огневым средствам ПВО.

Техническое обеспечение РТП в боевых действиях организуется и осуществляется в целях бесперебойного обеспечения вооружением и военной техникой (ВВТ), боеприпасами и военно-техническим имуществом, содержания их в исправности и постоянной готовности к боевому применению, своевременного восполнения их потерь и расхода, а также быстрого восстановления при повреждениях. Восстановление и ремонт ВВТ в зависимости от условий обстановки, выполняемых задач, характера повреждений и наличия времени производится в местах выхода ВВТ из строя или в районе расположения ремонтного подразделения РТП – объединенной ремонтной мастерской. В первую очередь восстанавливаются ВВТ, от боеспособности которых в наибольшей степени зависит выполнение боевой задачи.

Неотъемлемой частью технического обеспечения является метрологическое обеспечение войск (сил) РТП. Под метрологическим обеспечением ВС РФ понимается комплекс мероприятий по установлению и применению научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемых точности, полноты, своевременности и оперативности измерений в войсках [1]. Силами и средствами метрологического обеспечения войск (сил) в боевых действиях РТП, как правило, являются их метрологические подразделения. Метрологические подразделения – отделения (диагностики

и ремонта средств радиолокации и средств измерений) действуют в составе объединенных ремонтных мастерских (ОРМ) РТП. Метрологические подразделения предназначены для восстановления и поверки средств измерений военного назначения (СИ ВН). Восстановление является одним из основных источников восполнения потерь СИ ВН в ходе боевых действий. Задачи по восстановлению и поверке СИ ВН решаются с использованием технических возможностей метрологических подразделений. Технические возможности метрологических подразделений по восстановлению и поверке СИ ВН определяются их оснащением поверочным оборудованием.

В случае массового выхода из строя ВВТ подразделений РТП, например, после массового ракетного авиационного удара, по решению командира РТП из состава ОРМ выделяется ремонтно-восстановительная бригада (РВБ) для восстановления ВВТ на позициях их развертывания. Как правило, в состав РВБ входят силы и средства метрологического подразделения РТП.

С целью оптимального распределения сил и средств метрологических подразделений ОРМ РТП для повышения результативности поверки СИ ВН целесообразно применение алгоритмов, позволяющих повышать оперативность принятия решений по организации и осуществлению мероприятий метрологического обеспечения войск (сил) в боевых действиях РТП. В данной работе авторами предложен алгоритм распределения поверочного оборудования метрологических подразделений ОРМ РТП при осуществлении мероприятий метрологического обеспечения войск (сил) в условиях боевых действий с учетом ограничений на значения коэффициентов загруженности поверочного оборудования рабочих мест (РМ), основанный на подходах, рассмотренных в [2–6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в метрологическом подразделении РТП имеется n рабочих мест, которые необходимо распределить между k воинскими подразделениями РТП, причем использование i -го РМ в j -м воинском подразделении характеризуется коэффициентом загруженности РМ ρ_{ij} . Требуется так распределить каждое РМ между воинскими подразделениями, чтобы максимизировать суммарный коэффициент загруженности РМ метрологического подразделения.

Введем переменные d_{ij} , характеризующие распределение РМ, при этом $d_{ij}=1$, если i -е РМ распределено в j -е воинское подразделение РТП, в противном случае $d_{ij}=0$, где $D=(d_{ij})$ – оптимальное решение задачи распределения поверочного оборудования метрологического подразделения, $i=1, \dots, n, j=1, \dots, k$.

С учетом того, что каждое из РМ распределяется только в одно из воинских подразделений, необходимо решить задачу:

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \rho_{ij} d_{ij}, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n d_{ij} &\leq n, \quad j = \overline{1, k}, \\ \sum_{j=1}^k d_{ij} &= 1, \quad i = \overline{1, n}, \\ d_{ij} &\in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}. \end{aligned}$$

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

С целью оптимального распределения поверочного оборудования РМ метрологических подразделений между подразделениями РТП в условиях осуществления мероприятий метрологического обеспечения войск (сил) авторами предложен подход к принятию решений в ал-

горитмической форме, позволяющий распределять поверочное оборудование РМ для достижения максимальной результативности поверки СИ ВН с учетом ограничений на время проведения поверочных работ и значение коэффициента загруженности поверочного оборудования РМ.

Алгоритм распределения поверочного оборудования метрологических подразделений радиотехнических полков при осуществлении мероприятий метрологического обеспечения войск (сил) в условиях боевых действий заключается в последовательном выполнении определенных действий, которые можно разделить на несколько основных блоков.

Блок 1. Формирование и ввод исходных данных (табл. 1).

Шаг 1. Ввод исходных данных, которые включают: состав РМ метрологического подразделения РТП; допустимую длительность проведения поверочных работ; количества СИ ВН i -х типов в j -х подразделениях; нормы времени на поверку СИ ВН i -х типов.

Таблица 1

Исходные данные

№ п/п	Номер РМ, i	Количество комплектов РМ, U_i	Норма времени на поверку, τ_i	Подразделение 1	...	Подразделение j	Допустимое время на поверку $T^{\text{д}}$
1	1	U_1	τ_1	a_{11}	...	a_{1j}	$T^{\text{д}}$
...
i	i	U_i	τ_i	a_{i1}	...	a_{ij}	$T^{\text{д}}$

Блок 2. Формирование массива значений коэффициентов загруженности рабочих мест (рис. 1).

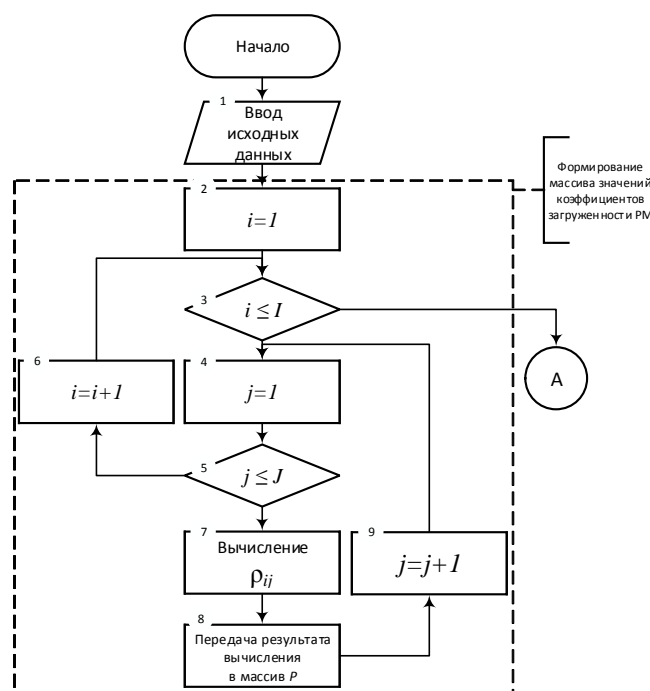


Рис. 1. Формирование массива значений коэффициентов загруженности рабочих мест

Шаг 2. Установка начального значения номера рабочего места $i = 1$.

Шаг 3. Проверка окончания перебора рабочих мест исходя из условия $i \leq I$, где $i = \overline{1, I}$, I – максимальное количество рабочих мест. Если данное условие не выполняется, то осуществляется переход к шагу 10.

Шаг 4. Установка начального значения номера подразделения РТП $j = 1$.

Шаг 5. Проверка условия окончания перебора подразделений РТП $j \leq J$, где $j = \overline{1, J}$, J – максимальное количество подразделений РТП, в которые необходимо распределить по-

верочное оборудование. Если условие не выполняется, осуществляется переход к шагу 6. В противном случае выполняется шаг 7.

Шаг 6. Переход к следующему рабочему месту $i = i + 1$.

Шаг 7. Расчет значения коэффициента загруженности рабочего места ρ_{ij} для i -го рабочего места при использовании для поверки a_{ij} СИ ВН в j -м подразделении РТП по формуле:

$$\rho_{ij} = \frac{a_{ij} \tau_i}{U_i T^{\text{Д}}}, \quad (2)$$

где a_{ij} – количество СИ ВН i -го типа в j -м подразделении РТП;

τ_i – норма времени на поверку СИ ВН i -го типа;

U_i – количество комплектов РМ i -го типа;

$T^{\text{Д}}$ – допустимая длительность проведения поверочных работ.

Шаг 8. Передача полученного значения коэффициента в массив данных:

$$P = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \dots & \rho_{1j} \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_{i1} & \dots & \rho_{ij} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Шаг 9. Переход к следующему подразделению РТП $j = j + 1$.

Блок 3. Формирование исходного массива оптимального решения (рис. 2).

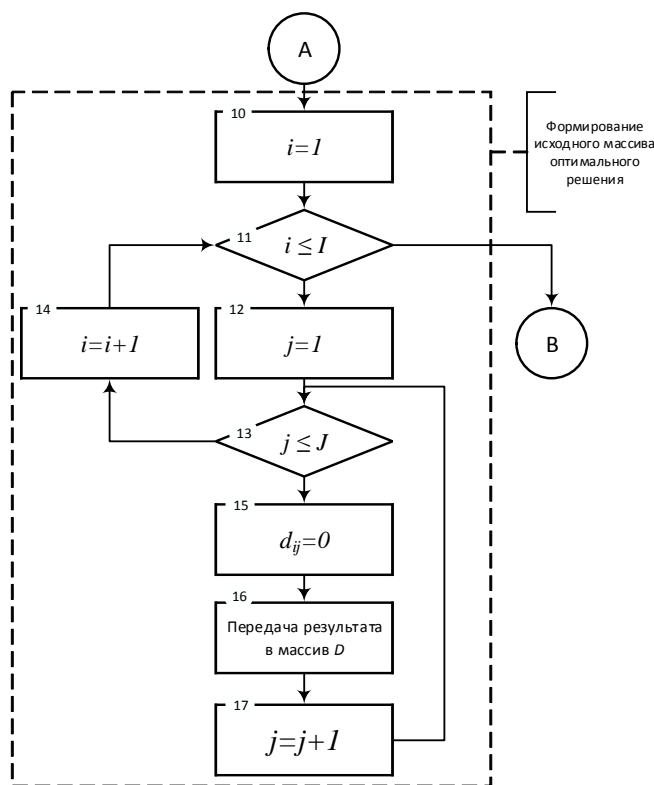


Рис. 2. Формирование исходного массива оптимального решения

Шаг 10. Установка начального значения строки исходного массива оптимального решения $i = 1$.

Шаг 11. Проверка условия окончания перебора строк исходного массива оптимального решения $i \leq I$, где $i = \overline{1, I}$, I – максимальное количество строк.

Шаг 12. Установка начального значения номера элемента строки исходного массива оптимального решения $j = 1$. Если условие не выполняется, то осуществляется переход к шагу 18.

Шаг 13. Проверка условия окончания перебора элементов строки $j \leq J$, где $j = \overline{1, J}$, J – максимальное количество элементов в строке. Если условие не выполняется, то осуществляется переход к шагу 14. В противном случае осуществляется шаг 15.

Шаг 14. Переход к следующей строке исходного массива оптимального решения $i = i + 1$.

Шаг 15. Установка значения элемента исходного массива оптимального решения $d_{ij} = 0$.

Шаг 16. Передача значения в исходный массив оптимального решения:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1j} \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{i1} & \dots & d_{ij} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Шаг 17. Переход к следующему элементу строки $j = j + 1$.

Блок 4. Определение и формирование массива оптимального решения (рис. 3).

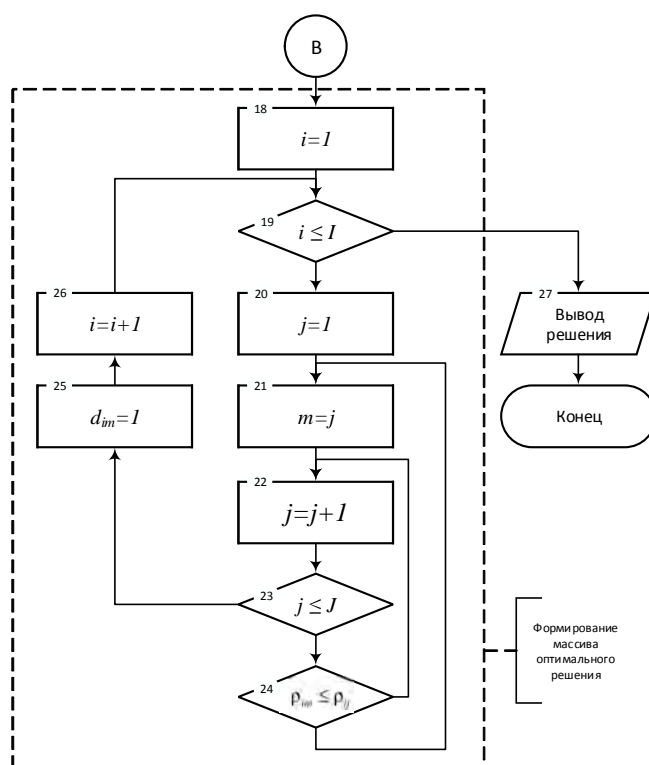


Рис. 3. Формирование оптимального решения

Шаг 18. Установка начального номера строки $i = 1$.

Шаг 19. Проверка условия перебора строк $i \leq I$. Если условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 20. В противном случае осуществляется шаг 27.

Шаг 20. Установка начального номера элемента строки $j = 1$.

Шаг 21. Установка номера опорного элемента строки $m = j$.

Шаг 22. Установка номера сравниваемого элемента $j = j + 1$.

Шаг 23. Проверка условия окончания перебора элементов строки $j \leq J$. Если условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 24. В противном случае осуществляется шаг 25.

Шаг 24. Сравнение значений коэффициентов загруженности поверочного оборудования $\rho_{im} \leq \rho_{ij}$. Если условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 21. В противном случае осуществляется переход к шагу 22.

Шаг 25. Установка значения m -го элемента i -й строки в массиве оптимального решения $d_{im} = 1$.

Шаг 26. Переход к следующей строке $i = i + 1$.

Шаг 27. Вывод оптимального решения распределения поверочного оборудования рабочих мест между подразделениями РТП.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

Заместителю командира радиотехнического полка по вооружению необходимо подготовить предложения в план технического обеспечения и, соответственно, отразить в нем вопросы метрологического обеспечения. В частности, необходимо подготовить предложения по распределению поверочного оборудования метрологического подразделения между тремя подразделениями РТП. В первом подразделении дислоцируется метрологическое подразделение, во второе и третье подразделения выделяются ремонтно-восстановительные бригады. Известно, что в метрологическом подразделении эксплуатируется пять рабочих мест: РМ № 1 по поверке СИ механических величин; РМ № 2 по поверке СИ давления и вакуума; РМ № 3 по поверке СИ времени и частоты; РМ № 4 по поверке радиотехнических и радиоэлектронных СИ; РМ № 5 по поверке СИ электрических и магнитных величин.

Поверочные работы необходимо осуществить в течение суток, с учетом того, что работы будут осуществлять в две рабочие смены по 16 часов в сутки. Соответственно, среднее время осуществления поверочных работ по одному из видов средств измерений составит 3,2 часа. Данное значение принимаем за допустимую длительность проведения поверочных работ. Общие исходные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные примера применения алгоритма

Номер РМ, i	Количество комплектов РМ, U_i	Норма времени на поверку, (ч) τ_i	Кол-ва i -х СИ в j -х подразделениях			Допустимое время на поверку, ч.
			1	2	3	
1	1	0,3	4	2	1	3,2
2	1	0,15	3	10	2	3,2
3	1	0,5	6	5	3	3,2
4	1	1,2	1	11	4	3,2
5	1	0,2	15	16	7	3,2

Итерация 1. Осуществляя операции алгоритма, определим массив значений коэффициентов загрузки поверочного оборудования:

$$P = \begin{pmatrix} 0,38 & 0,19 & 0,09 \\ 0,14 & 0,46 & 0,09 \\ 0,93 & 0,78 & 0,46 \\ 0,37 & 4,12 & 1,50 \\ 0,93 & 1,00 & 0,43 \end{pmatrix}.$$

Произведя построчное сравнение значений коэффициентов загрузки поверочного оборудования рабочих мест, определим оптимальное распределение РМ между тремя подразделениями РТП:

$$D_{\text{исх}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow P = \begin{pmatrix} 0,38 & \dots & \dots \\ \dots & 0,46 & \dots \\ 0,93 & \dots & \dots \\ \dots & 4,12 & \dots \\ \dots & 1,00 & \dots \end{pmatrix} \Rightarrow D_{\text{реш}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В соответствии с полученным решением рабочие места № 1 и 3 остаются в метрологическом подразделении, а РМ № 2, 4 и 5 отправляются в составе РВБ в подразделение № 2.

Итерация 2. Необходимо понимать, что СИ ВН третьего подразделения будут направлены в первое подразделение, в котором расположено метрологическое подразделение. Необходимо проверить полученное решение итерации 1. Определим массив значений коэффициентов загрузки поверочного оборудования для двух подразделений:

$$P = \begin{pmatrix} 0,47 & 0,19 \\ 0,23 & 0,46 \\ 1,39 & 0,78 \\ 1,87 & 4,12 \\ 1,36 & 1,00 \end{pmatrix}.$$

Определим оптимальное распределение РМ между подразделениями РТП:

$$D_{\text{исх}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow P = \begin{pmatrix} 0,47 & \dots \\ \dots & 0,46 \\ 1,39 & \dots \\ \dots & 4,12 \\ 1,36 & \dots \end{pmatrix} \Rightarrow D_{\text{реш}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Учет перераспределения нагрузки на метрологическое подразделение корректирует оптимальное решение и таким образом РМ № 1, 3 и 5 остаются в метрологическом подразделении, а РМ № 2 и 4 отправляются в составе РВБ в подразделение № 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, алгоритм распределения поверочного оборудования метрологических подразделений радиотехнических полков при осуществлении мероприятий метрологического обеспечения войск (сил) в условиях боевых действий позволяет оперативно принимать решения по оптимальному распределению поверочного оборудования РМ метрологических подразделений РТП с учетом ограничения на значения коэффициентов загрузки РМ и ограничений времени на поверочные работы. Дальнейшее применение предложенного алгоритма заключается в реализации на его основе программного обеспечения и апробации в рамках проведения командно-штабных учений в радиотехническом полку.

Список используемых источников

1. Об утверждении Руководства по метрологическому обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации: приказ Министра обороны РФ № 3750 от 19 декабря 2012 года.
2. Ахметов Р.Р. Основы материально-технического обеспечения войск: учеб. пособие. – Омск: СибАДИ, 2011. – 152 с.
3. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – 2-е изд., стер. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
4. Грудинин И.В., Кумакиев М.Н., Соколов М.В. Способы определения рациональной структуры системы управления техническим обеспечением боевых действий войск ПВО // Радиопромышленность. – 2009. – № 1. – С. 42–49.
5. Москвин Б.В. Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 383 с.
6. Поляков С.А. Методический подход к оптимизации управления материально-техническим обеспечением войск (сил) // Армия и общество. – 2008. – № 2. – С. 82–87.

А.Н. Дьяков,
кандидат техн. наук;
А.С. Кокарев,
кандидат техн. наук;
В.В. Тришункин,
кандидат экономических наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОСТАВКИ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСОВ ВООРУЖЕНИЯ

В современных экономических условиях особенную важность приобретает вопрос повышения эффективности вооружения. Рассматривая эксплуатационно-техническую составляющую, можно отметить несколько наиболее важных направлений повышения эффективности, от которых на этапе эксплуатации в значительной мере зависит объем бюджетного финансирования, потребного на поддержание требуемых показателей готовности. Одно из таких направлений, а именно обоснование требований к показателям ремонтпригодности за счет планирования организационно-технических мероприятий (исключая вопросы квалификации персонала), рассматривается в представленной статье. Проведен анализ ГОСТ 27.507–2015 [1], используемого в настоящее время для формирования комплектов запасных частей инструментов и принадлежностей, показаны недостатки применения [1] в отношении образцов вооружения ВКС. Предложена методика, позволяющая устранить выявленные недостатки научно-методического обеспечения, применение разработанной методики позволяет обосновать состав двухуровневого ЗИП (по каждой номенклатуре), обеспечивающего с минимальными затратами поддержание показателя готовности на требуемом уровне.

Ключевые слова: обоснование комплекта ЗИП, повышение показателей ремонтпригодности, расчет показателя готовности.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность обеспечения готовности вооружения и военной техники к целевому применению никогда не вызывала сомнений. Подходы к решению этой задачи аналогичны у всех предприятий оборонно-промышленного комплекса вне зависимости от вида выпускаемой продукции. Несомненно, вид вооружения, военной техники, особенности ее применения и эксплуатации определяют соотношение усилий по отдельным направлениям, однако сами направления повышения готовности неизменны у большей части опытно-конструкторских работ. К числу наиболее важных направлений можно отнести повышение квалификации обслуживающего персонала, безотказности и ремонтпригодности. Первое направление лежит в области пересечения технических и педагогических вопросов, а также кадровой политики, и в представленной статье не рассматривается. Рассмотрение вопросов повышения надежности не теряло своей актуальности со времен первой промышленной революции, актуальны эти вопросы и в настоящее время, однако при их рассмотрении в настоящее время все большее значение приобретает не собственно показатели надежности, а их соотношение с величиной затрачиваемых ресурсов. Направление повышения безотказности рассматривается применительно к конкретному элементу вооружения, физическим процессам реализации его свойств, вследствие чего указанные вопросы имеют достаточно узкую специализацию, а их решение специфично на каждом предприятии. Вопросы повышения ремонтпригодности за счет планирования организационно-технических мероприятий (исключая вопросы квалификации персонала) имеют более общий характер, а их решение может быть в значительной степени стандартизовано, подходы унифицированы безотносительно специфики рассматриваемого образца вооружения. Одним из подобных способов управления ремонтпригодностью является обоснование состава приданного комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП).

В настоящее время применяется научно-методическое обеспечение, позволяющее рассчитывать оптимальный комплект ЗИП с учетом различных факторов. К наиболее известным можно отнести работы Е.Ю. Барзиловича, А.Э. Шура-Буры, Г.Н. Черкесова. Работы последних двух авторов послужили основой для используемых в настоящее время ГОСТ 27.507–2015 «Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов» [1] и предшествовавшего ему ГОСТ РВ 27.3.03–2005 «Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП» [2].

Практика эксплуатации вооружения и военной техники в Воздушно-космических силах показывает несовершенство существующей методологии формирования комплектов ЗИП в процессе создания образцов ВВТ. Так, при утилизации отдельных образцов вооружения из состава ракетно-космических комплексов были выявлены номенклатуры ЗИП, которые не были востребованы как в течение первоначально установленного, так и неоднократно продленного срока службы (ресурса). Противоположная ситуация в подразделениях, эксплуатирующих передающие радиотехнические объекты, где состав комплектов ЗИП неоднократно пересматривался как на завершающей стадии опытно-конструкторских работ, так и после ввода объекта в эксплуатацию. Подобная ситуация стала возможной отчасти из-за неточности исходных статистических данных, определяющих показатели надежности современной элементной базы, но в значительной степени из-за несовершенства применяемого научно-методического обеспечения, которое в недостаточной степени учитывает особенности эксплуатации и тактического применения конкретного образца вооружения.

Одним из основных представителей, применяемого в настоящее время научно-методического обеспечения можно назвать ГОСТ РВ 27.507–2015, где описаны общая методология, порядок и типовые методики расчета оптимальных запасов в комплектах ЗИП. Действие указанного стандарта распространяется на восстанавливаемые и обслуживаемые изделия военной техники. Для обеспечения их ремонтпригодности предусматриваются одиночные и (или) групповые комплекты запасных частей (ЗЧ), инструмента и принадлежностей. Положения настоящего стандарта подлежат применению организациями МО РФ, других министерств и ведомств и иными расположенными на территории РФ предприятиями и организациями независимо от форм собственности и подчиненности, имеющими отношение к разработке, производству, эксплуатации и ремонту изделий военной техники и участвующими в выполнении государственного оборонного заказа.

Анализ содержания ГОСТ 27.507–2015, а также его апробация для расчета оптимального комплекта ЗИП зенитного ракетного комплекса (ЗРК) позволили выделить ряд недостатков, препятствующих получению достоверного результата при использовании приведенных в ГОСТ методик на практике, приведем основные:

- в составе методик в качестве целевого показателя используется показатель надежности и показатель достаточности комплекта ЗИП, который агрегируется с показателем готовности образца вооружения для оценки эффективности организационно-технической системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Для получения адекватной оценки представляется целесообразным исследовать функционирование организационно-технической системы более высокой иерархии: использовать зависимость, моделирующую взаимодействие системы поставок составных частей с образцом вооружения, либо функционирование системы ТОиР вооружения в целом;

- в качестве второго целевого показателя вполне обоснованно предложено использовать среднее время задержки удовлетворения заявок на запасные части $\Delta t_{\text{ЗИП}}^{\text{TP}}$, аналогичный показатель – LRT «Время реакции на логистический запрос» использован в методологии PBL, однако вызывает затруднение применение на практике расчетной формулы (обозначенной в [1] 5.2):

$$\Delta t_{\text{ЗИП}}^{\text{TP}} = \sum_{i=1}^N \Lambda_{zi} \leq 0,1, \quad (1)$$

где Λ_{zi} – интенсивность замен составной части i -го типа имеет единицы измерения – число замен в единицу времени;

– в составе методик использован экспоненциальный закон распределения, в качестве входных данных использованы интенсивность заявок и среднее время задержки удовлетворения заявок. Применение подобной модели в качестве единственной не обеспечивает достаточной гибкости, в ряде случаев не позволяет обеспечивать адекватность моделирования эксплуатационных процессов составных частей ВВТ, в основе функционирования которых лежат существенно различные физические принципы. По мнению авторов для обеспечения большей достоверности результатов моделирования эксплуатационных процессов образцов ВВТ различного назначения и их составных частей предпочтительно использовать модели, позволяющие использовать различные законы распределения с учетом особенностей образца вооружения и условий его применения;

– модель расчета затрат, соответствующих обеспечиваемому показателю готовности, отличается от собственно модели расчета готовности, в моделях использованы различные свободные переменные. С математической точки зрения трудно доказать соответствие друг другу результатов применения этих моделей, адекватность соотнесения полученных результатов между собой заслуживает отдельного исследования;

– приведенные методики предусматривают применение различных стратегий пополнения ЗИП, однако в них не делается поправки, обусловленной синергетическим эффектом в случае применения одинаковых стратегий с совпадающими периодами пополнения, что снижает достоверность прогнозных значений эксплуатационных затрат;

– методика оптимизации построена на основе градиентного метода оптимизации, с учетом дискретности задачи представляется предпочтительным использование целочисленной оптимизации;

– при вычислении оптимальных запасов в комплекте ЗИП-О по методикам 10.1.2, 10.1.3 [1], производится расчёт дополнительного безразмерного «промежуточного расчетного показателя – R_{jo} », характеризующего соотношение интенсивностей запросов замены запасной части и среднего времени задержки запасной части. Далее величина промежуточного расчетного показателя сравнивается с требуемой величиной расчетного показателя – D_0 , который также рассчитывается, но на основе требуемого значения готовности либо длительности задержки

$$R_{jo}(A_{jo}; L_{jo}^0) \leq D_0. \quad (2)$$

Оперирование имеющимися исходными данными, расчет двух дополнительных безразмерных показателей, их сравнение и принятие дальнейшего решения предполагается проводить лично оператором, с последующим перемещением значений в таблице. Процесс расчетов представляется излишне трудоемким, а алгоритмизация приведенных расчетов представляется достаточно сложной задачей. В качестве альтернативного способа обоснования оптимального комплекта представляется предпочтительным получение зависимости целевого показателя напрямую от искомых аргументов без дополнительных промежуточных показателей.

МОДЕЛЬ ГОТОВНОСТИ ЗЕНИТНО-РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОСТАВОК ЗАПАСОВ

Важнейшей компонентой поддержания высокой готовности ЗРК к применению по назначению является бесперебойное функционирование системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и системы обеспечения ремонтными средствами и запасными частями. С учетом специфики системы эксплуатации ЗРК и тактического построения можно выделить наиболее важные факторы, учет которых позволит повысить адекватность моделирования и

обеспечит выбор оптимальных параметров системы поставок запасов создаваемых комплексов вооружения. В качестве наиболее важной особенности можно назвать противоречивые требования к показателям готовности, длительности восстановления работоспособного состояния, с одной стороны, и высокими требованиями к мобильности, автономности функционирования, с другой стороны. Отдельного внимания заслуживает удаленность и труднодоступность мест дислокации, а также разнотипность составных частей образцов ВВТ, применяемых в составе группы изделий (зенитного ракетного комплекса).

Вектор развития Вооруженных сил, определяемый «Основными направлениями развития вооружения, военной и специальной техники» [3], требует повышения технико-экономической эффективности и снижения эксплуатационных расходов создаваемых образцов вооружения. Для реализации указанного требования необходимо обеспечить требуемые показатели готовности ЗРК не только при обоснованной стоимости приобретения, но и с минимальными эксплуатационными затратами. С учетом указанных обстоятельств для расчета оптимального комплекта ЗИП предлагается использовать модель со следующими целевыми функциями и ограничениями:

$$K_{\Gamma} = f(S; m; a); \quad (3)$$

$$C = g(S; m; b). \quad (4)$$

Взамен предложенного в [1] показателя среднего времени задержки удовлетворения заявок на запасные части предлагается использовать приведенный в [4] показатель времени до восстановления

$$\Delta t_{\text{ЗИП}} = q(S; m), \quad (5)$$

под которым понимается все время от момента отказа до восстановления работоспособного состояния, что позволит исследовать функционирование всей организационно-технической системы поставки ЗИП в целом.

Для обоснования рациональных параметров системы обеспечения ЗИП, обеспечивающих минимальные эксплуатационные расходы при заданных показателях готовности и длительности восстановления работоспособного состояния требуется найти

$$P^* = \arg \min_{P \in \Delta} C(S; m; b); \quad (6)$$

$$P \in \Delta \mid K_{\Gamma}(S; m; a) \geq K_{\Gamma}^{\text{Тр}}; \Delta t_{\text{ЗИП}}(S; m) \geq \Delta t_{\text{ЗИП}}^{\text{Тр}}, \quad (7)$$

где P – вектор, элементами которого являются параметры системы обеспечения ЗИП $P = \{S; m; a\}$;

S – вектор временных показателей, характеризующих ремонтпригодность;

m – вектор состава элементов ЗИП на различных уровнях (ЗИП-О, ЗИП-Г);

a, b – векторы надежностных и организационно-технических параметров системы технического обслуживания и ремонта.

Под обоснованием параметров системы обеспечения ЗИП понимается выбор и взаимная увязка иерархии эшелонирования и мест размещения элементов ЗИП ЗРК. Для решения поставленной задачи предлагается использовать модель, сущность которой представлена графом на рис. 1. Модель позволяет исследовать функционирование системы обеспечения ЗИП группы зенитных-ракетных комплексов, эксплуатируемых обособленно и автономно. Для каждого комплекса предусмотрен комплект ЗИП-О. Групповой комплект ЗИП разделен на два полукомплекта. Полукомплект ЗИП-ГА размещен на транспортном средстве и предназначен для пополнения ЗИП-О зенитных ракетных комплексов в местах несения боевого дежурства, а также подвоза элементов по отдельным номенклатурам, наличие которых в ЗИП-О не предусмотрено. Полукомплект ЗИП-ГБ размещен в месте постоянной дислокации подразделения и предназначен для восстановления работоспособного состояния зенитных ракетных комплексов после завершения боевого дежурства в местах постоянной дислокации, а

также для пополнения передвижного полукомплекта ЗИП-ГА. Степень удаления зенитных ракетных комплексов друг от друга, а их группы от места постоянной дислокации зависит от тактики применения конкретного подразделения и определяет длительность задержки в получении потребных элементов из ЗИП-ГА или ЗИП-ГБ.

Подробнее рассмотрим функционирование модели, представленной графом. Образец ВВТ может находиться в работоспособном (S1) либо в одном из неработоспособных (S2–S6) состояний. Переход в неработоспособное состояние S2 происходит в результате отказа составной части n , $n = \overline{1, N}$ номенклатуры $nom_i, i = \overline{1, I}$. Поток изменения состояний простейший. В начальный момент времени $t=0$ система находится в работоспособном состоянии S1. Через случайное время система мгновенно переходит в другое состояние с вероятностью $p_{kj} \geq 0$. Примем допущение о принятых законах переходов между состояниями, которые также представлены на рис. 1 [5].

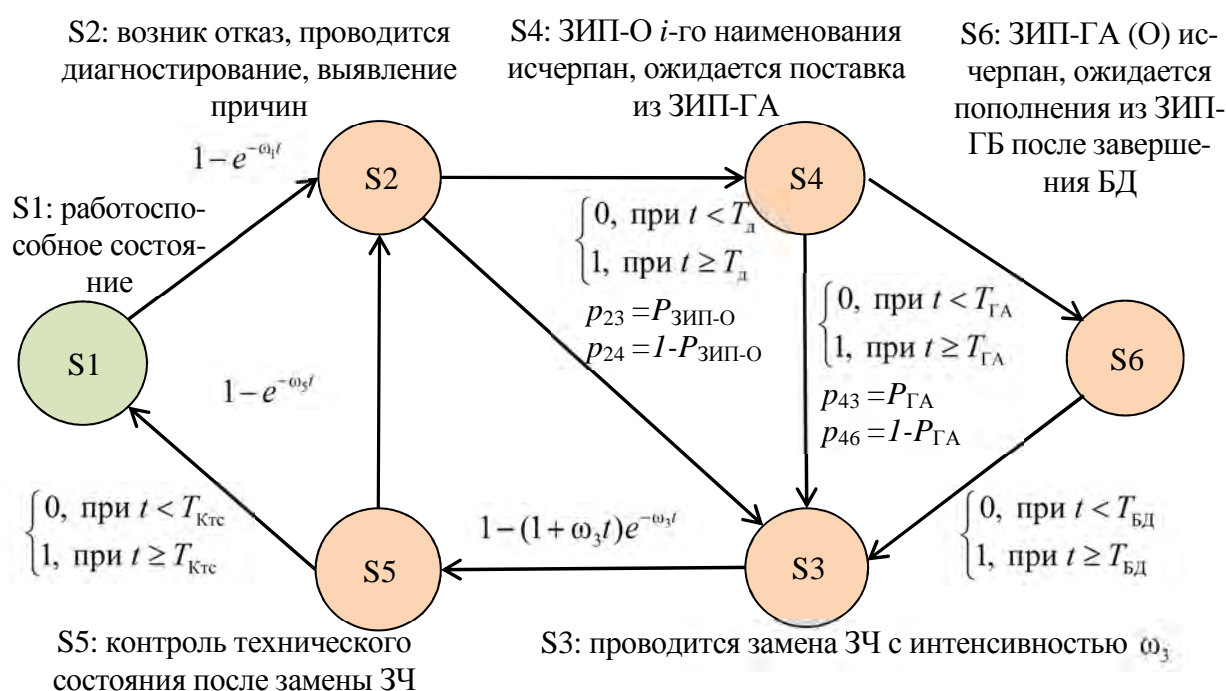


Рис. 1. Граф модели готовности ЗРК

В графовой модели обозначены:

- ω_1 — параметр потока отказов объекта;
- ω_3 — параметр потока восстановления отказов;
- ω_5 — параметр потока отказов, выявляемых при контроле технического состояния объекта исследования после установки элементов ЗИП, обусловлен математическим ожиданием срока сохраняемости элементов ЗИП;
- $T_{ГА}$ — длительность ожидания поставки элементов, отсутствующих в комплекте ЗИП-О из состава ЗИП-ГА;
- T_d — длительность диагностирования, выявления причины отказа, поиска отказавшего элемента;
- $T_{ГБ}$ — длительность нахождения объекта исследования на маршруте патрулирования, сопряженная с невозможностью воспользоваться элементами из состава ЗИП-ГБ после израсходования запаса ЗИП-ГА;

- $T_{\text{Ктс}}$ – длительность контроля технического состояния после замены элемента ЗИП;
 n – количество элементов i -го наименования в составе объекта исследования;
 m – количество элементов i -го наименования в составе ЗИП;
 $P_{\text{ЗИП-О}}$ – вероятность достаточности комплекта ЗИП-О объекта исследования;
 $P_{\text{ГА}}$ – вероятность достаточности возимого полуккомплекта ЗИП-ГА.

Сущность вероятности $P_{\text{ЗИП}}$ состоит в возможности после диагностирования отказа приступить к замене элемента из состава ЗИП, либо ожидать его поставку в случае, если элементы данной номенклатуры израсходованы (не предусмотрены). Данная величина аналогично [1] определяется на основе закона Пуассона

$$P_{\text{ЗИП-О}} = e^{-n_i \lambda_i T_{\text{ПП}}} \sum_{k=0}^m \frac{(n_i \lambda_i T_{\text{ПП}})^k}{k!}, \quad (8)$$

где λ_i – интенсивность отказов элементов i -ой номенклатуры;

$T_{\text{ПП}}$ – плановый период пополнения ЗИП-О;

n_i – количество элементов i -й номенклатуры в составе образца вооружения.

Пополнение ЗИП-О осуществляется из состава ЗИП-ГА, который, в свою очередь, восполняется из состава ЗИП-ГБ после возвращения к месту постоянной дислокации. Вероятность достаточности ЗИП-ГА аналогично (8) определяется как

$$P_{\text{ГА}} = e^{-n_i \lambda_i T_{\text{БД}}} \sum_{k=0}^m \frac{(n_i \lambda_i T_{\text{БД}})^k}{k!}, \quad (9)$$

где λ_i – интенсивность отказов элементов i -й номенклатуры;

$T_{\text{БД}}$ – плановый период завершения боевого патрулирования, возвращения к месту постоянной дислокации и пополнения ЗИП-ГА;

n_i – количество элементов i -й номенклатуры в составе образца вооружения.

Составим аналитическую модель готовности зенитного ракетного комплекса, для чего используем методологию на основе широко применяемого подхода исследования полумарковских процессов с вложенными марковскими цепями, подобный изложенному в [5, 7, 8]. Вывод зависимостей, описывающих переходы между состояниями аналогичен приведенному в [5, 8, 10], в настоящей статье не приводится, отметим лишь применение в их составе законов Пуассона (8) и (9).

Аналитическое выражение для расчета показателя эффективности системы ТООР с учетом функционирования системы поставки ЗИП, в качестве которого используется стационарный коэффициент готовности по ГОСТ [4], получено в виде

$$K_{\text{Г}}(S; m) = (1/\omega_1) / (1/\omega_1 + p_{52}/p_{51}T_{\text{д}} + p_{52}/p_{51}(p_{23} + p_{43}p_{24} + p_{46}p_{24})2/\omega_3 + \\ + T_{\text{ГА}}p_{24}p_{52}/p_{51} + (p_{23} + p_{43}p_{24} + p_{46}p_{24})p_{52}/p_{51}(1/\omega_5 - e^{-\omega_5 T_{\text{Ктс}}}/\omega_5) + T_{\text{БД}}p_{46}p_{24}p_{52}/p_{51}). \quad (10)$$

РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСАМИ

В дополнение к полученной модели расчета показателя результативности аналогично [5, 8, 9] получена аналитическая зависимость для расчета показателей ресурсоемкости выполняемых мероприятий, обозначенных в ГОСТе [11].

При выводе аналитической зависимости была использована вспомогательная модель:

$$\bar{C} = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^n \pi_k \left[C_{kk} \bar{t}_k + \sum_{j \in E} p_{kj} C_{kj} \right], \quad (11)$$

где C_{kk} – средние затраты за единицу времени пребывания в k -м состоянии;

C_{kj} – средние затраты на переход из k -го состояния в j -е.

Используя допущение о пропорциональности затрат времени пребывания в k -м состоянии $C_{kj} \equiv 0$, проведем расчет затрат на единицу времени

$$\bar{C} = \frac{1}{\bar{t}} \sum_{k=1}^n C_{kk} \pi_k \bar{t}_k. \quad (12)$$

Введем величины затрат при нахождении системы в состояниях модели. Опуская второй индекс, обозначим затраты, обусловленные нахождением системы в состояниях S1–S6, как C_1 – C_6 . Множество известных моделей расчета составляющих эксплуатационных затрат описаны в [12, 13], в представленной статье используется упрощенная модель для каждого k -го состояния, представленная в виде

$$C_k = g_k(S; m; b); \quad (13)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{\bar{t}} (C_1 \pi_1 \bar{t}_1 + C_2 \pi_2 \bar{t}_2 + C_3 \pi_3 \bar{t}_3 + C_4 \pi_4 \bar{t}_4 + C_5 \pi_5 \bar{t}_5 + C_6 \pi_6 \bar{t}_6). \quad (14)$$

В конечном виде аналитическая зависимость расчета затрат по году представлена в виде

$$\begin{aligned} \bar{C} = & [C_1 \bar{t}_1 + C_2 \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) \bar{t}_2 + C_3 \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) (p_{12} + p_{43} p_{24} + p_{46} p_{24}) \bar{t}_3 + C_4 p_{24} \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) \bar{t}_4 + C_5 p_{35} \times \\ & \times \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) (p_{23} + p_{43} p_{24} + p_{46} p_{24}) \bar{t}_5 + C_6 p_{46} p_{24} \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) \bar{t}_6] / \bar{t}_1 + \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) \bar{t}_2 + \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) \times \\ & \times (p_{23} + p_{43} p_{24} + p_{46} p_{24}) \bar{t}_3 + p_{24} \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) \bar{t}_4 + p_{35} \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) (p_{23} + p_{43} p_{24} + p_{46} p_{24}) \bar{t}_5 + p_{46} p_{24} \left(p_{12} + \frac{p_{52}}{p_{51}} \right) \bar{t}_6. \end{aligned} \quad (15)$$

Полученная зависимость позволяет оценить усредненные затраты на функционирование вооружения с учетом принятой системы обеспечения ЗИП, которая характеризуется вектором S (показатели, характеризующие длительность устранения неисправности), и вектором m (показатели, характеризующие номенклатуру и количество элементов в комплектах ЗИП различного уровня). Аналогичный показатель для всего назначенного срока службы составит

$$\bar{C}_{\text{ср.сл}} = \bar{C} \bar{T}_{\text{ср.сл}} \quad (16)$$

где $\bar{T}_{\text{ср.сл}}$ – математическое ожидание срока службы образца вооружения.

Представленная модель позволяет установить взаимосвязь готовности зенитного ракетного комплекса и объема средств, потребных на функционирование проектируемой системы технического обслуживания и ремонта в части обеспечения элементами ЗИП. Применение модели позволяет обосновать наиболее предпочтительный состав ЗИП-О, ЗИП-ГА, которые с учетом особенностей тактического построения вооружения в позиционном районе обеспечивают требуемую готовность (10) с минимальными эксплуатационными затратами (15).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОСТАВКИ ЗИП ДЛЯ ЗЕНИТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

Рассматриваемая в статье методика имеет общий характер и с учетом адаптации может быть применена к любым сложным техническим комплексам, предлагается к апробации в качестве альтернативы методики, приведенной в ГОСТ 27.507–2015. В этой связи, в статье рассматривается несуществующий образец вооружения, численные значения параметров не соответствуют аналогичным значениям существующих образцов вооружения.

Порядок применения методики представлен в виде блок-схемы на рис. 2.

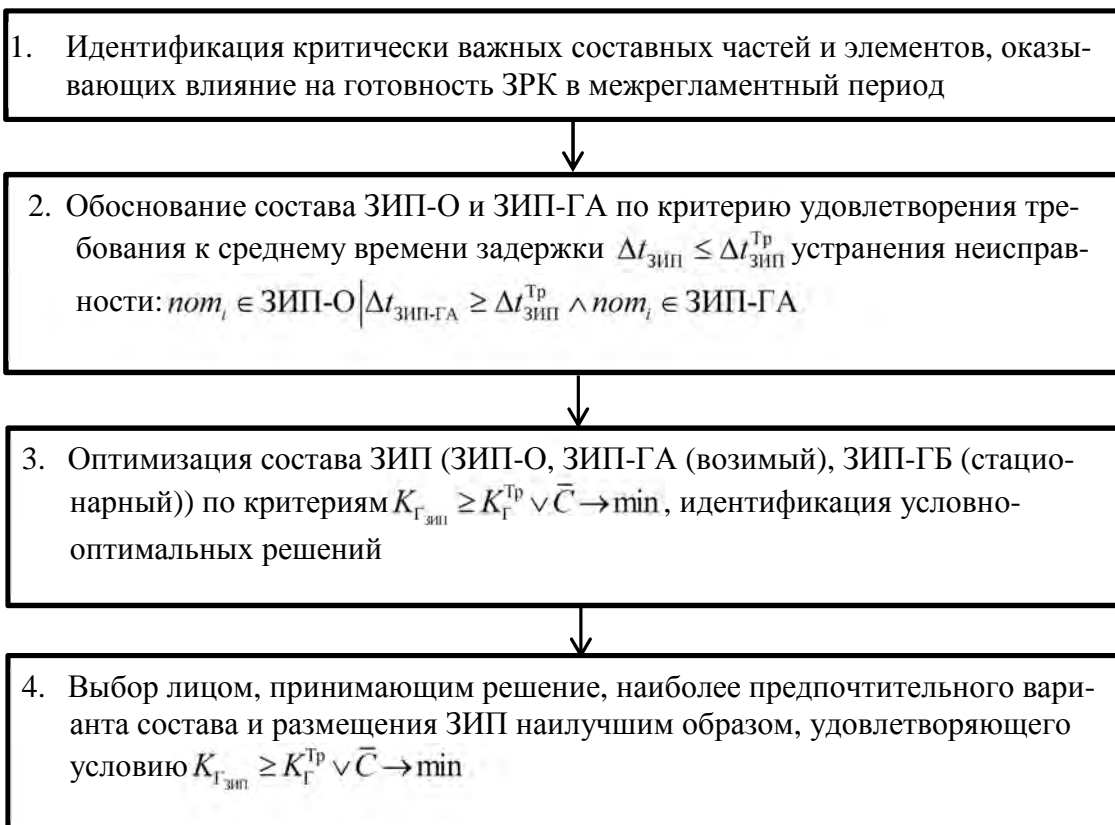


Рис. 2. Последовательность реализации методики обоснования системы поставок ЗИП

Используя модель, проведем расчет для единственной номенклатуры nom_i , исходные данные (вариант) для которой представлены в табл. 1. Дальнейшие расчеты для группы критически важных номенклатур проводятся в соответствии со структурной схемой надежности комплекса.

Таблица 1

**Показатели системы ТОиР,
характеризующие надежность ЗРК для номенклатуры nom_1**

Показатели системы поставки запасных частей, определяемые моделью тактического применения	Вариант применения M_i		
	M_1	M_2	M_3
Количество элементов n_{nom_1} в составе объекта	10	10	10
Количество элементов $m_{\text{О}}$ в составе ЗИП-О	10	10	8
Количество элементов $m_{\text{ГА}}$ в составе ЗИП-ГА	10	10	12
Параметр потока отказов элементов i -й номенклатуры (в условиях рассматриваемой задачи принимается допущение о постоянстве и равенстве интенсивности отказов) $\omega_{i_i} \equiv \lambda_i^*$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Параметр потока восстановления отказов ω_3	0,125	0,125	0,125
Параметр потока отказов при хранении ω_5	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Длительность диагностирования, поиска отказавшего элемента $T_{\text{д}}$	1	1	1

Окончание табл. 1

Показатели системы поставки запасных частей, определяемые моделью тактического применения	Вариант применения M_i		
	M_1	M_2	M_3
Длительность контроля технического состояния после замены элемента ЗИП $T_{\text{кис}}$	1,5	1,5	1,5
Срок службы зенитно-ракетного комплекса $T_{\text{ср.сл}}$, лет	10	10	10

Варианты типовых условий применения определяются тактикой применения конкретного подразделения и представлены временными и стоимостными характеристиками в табл. 2. В последнюю строку табл. 2 возвращены значения готовности и величины затрат, полученные при расчете по представленной модели.

Таблица 2

Временные и стоимостные показатели системы ТОиР (по номенклатуре nom_i), определяемые тактическим построением подразделения ЗРК

Показатели системы поставки запасных частей, определяемые моделью тактического применения	Особенности применения M_i		
	M_1	M_2	M_3
Длительность ожидания замены элементов, отсутствующих в ЗИП-О $T_{\text{ГА}}$	6	8	18
Длительность ожидания замены элементов, отсутствующих в ЗИП-ГА $T_{\text{ГБ}}$	2000	900	720
Плановый период пополнения комплектов ЗИП-О $T_{\text{ПП}}$	4000	4000	4000
Величина затрат в состоянии S1 $C_1 = f_1(nom_i, m_o, m_{\text{ГА}}, T_{\text{ГА}}, T_{\text{ГБ}})$	740	730	720
Величина затрат в состоянии S2 $C_2 = f_2(nom_i, m_o, m_{\text{ГА}}, T_{\text{ГА}}, T_{\text{ГБ}})$	740	730	720
Величина затрат в состоянии S3 с учетом ЗИП-О $C_3 = f_3(nom_i, m_o, m_{\text{ГА}}, T_{\text{ГА}}, T_{\text{ГБ}})$	1440	1580	1608
Величина затрат в состоянии S4 с учетом ЗИП-ГА $C_4 = f_4(nom_i, m_o, m_{\text{ГА}}, T_{\text{ГА}}, T_{\text{ГБ}})$	2240	3490	3440
Величина затрат в состоянии S5, $C_5 = f_5(nom_i, m_o, m_{\text{ГА}}, T_{\text{ГА}}, T_{\text{ГБ}})$	840	880	890
Величина затрат в состоянии S6 с учетом ЗИП-ГБ $C_6 = f_6(nom_i, m_o, m_{\text{ГА}}, T_{\text{ГА}}, T_{\text{ГБ}})$	3140	4120	4316
Полученные значения готовности – затрат	0,961 / $7267 \cdot 10^6$	0,981 / $6862 \cdot 10^6$	0,98 / $6498 \cdot 10^6$

Из представленных значений можно сделать следующие предварительные выводы.

Для варианта применения M_1 наличие в составе ЗИП $m_o=10$ и $m_{\text{ГА}}=10$ элементов по номенклатуре nom_i при прогнозируемых условиях эксплуатации позволит обеспечить $K_r=0,961$ с эксплуатационными затратами $\bar{C}=7267 \cdot 10^6$ усл. ед. В случае размещения подразделения ЗРК в другом позиционном районе условия тактического применения определя-

ют другие показатели системы ТОиР, часть из которых представлена в столбце M_2 табл. 2. Указанные параметры при аналогичном составе ЗИП позволят обеспечить $K_r = 0,981$ при ресурсоемкости эксплуатационных процессов $\bar{C} = 6862 \cdot 10^6$ усл. ед. В то же время перераспределение состава ЗИП между одиночным комплектом и групповыми полуккомплектами (см. гр. M_3 табл. 2) позволит обеспечить $K_r = 0,980$ с затратами $\bar{C} = 6498 \cdot 10^6$ усл. ед., предоставляя возможность лицу, принимающему решение, выбрать наилучший вариант системы ТОиР в части обеспечения ЗИП.

Возможность подобной оптимизации наглядно представлена на рис. 3–6, где представлены зависимости готовности и эксплуатационных затрат от соотношения составов ЗИП.

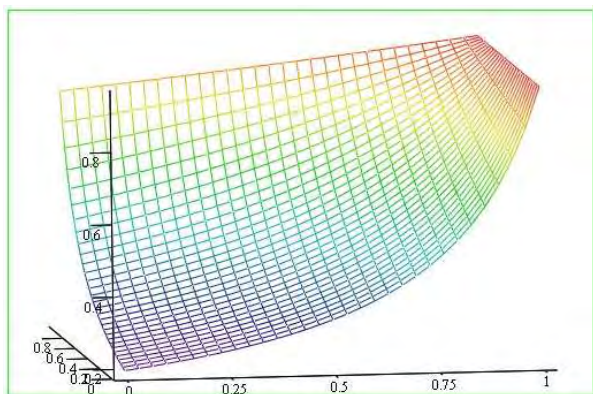


Рис. 3. Зависимость готовности ВВТ от состава ЗИП-О и ЗИП-ГА

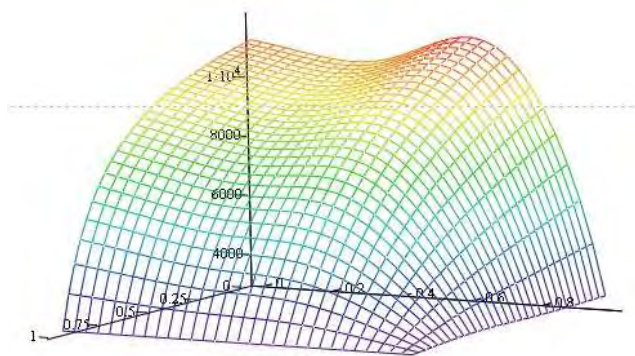


Рис. 4. Зависимость эксплуатационных затрат от состава ЗИП-О и ЗИП-ГА

На графике составы ЗИП на оси абсцисс и ординат представлены в единицах измерения – вероятности достаточности элементов ЗИП, рассчитанных по закону Пуассона (8), (9). На рис. 4 и 6 можно увидеть, каким образом при этих же значениях меняется величина затрат.

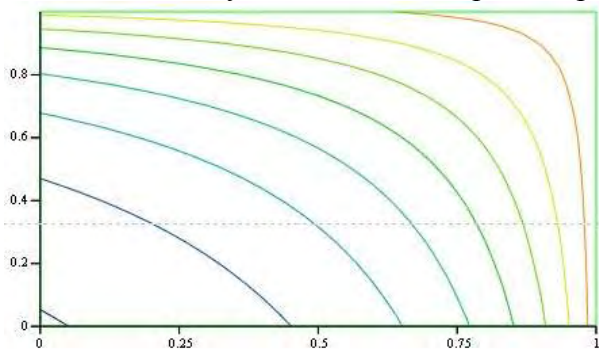


Рис. 5. Проекция зависимости готовности ВВТ от состава ЗИП-О (ось абсцисс) и ЗИП-ГА (ось ординат)

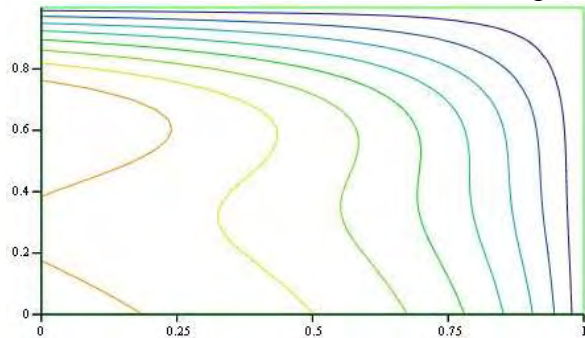


Рис. 6. Проекция зависимости эксплуатационных затрат от состава ЗИП-О (ось абсцисс) и ЗИП-ГА (ось ординат)

Очевидно, рассматривая совместно проекции графиков, можно идентифицировать оптимальный состав ЗИП-О и ЗИП-ГА, который обеспечит требуемую готовность с минимальными затратами.

Аналогичным образом модель позволяет обосновать наилучшее размещение ЗРК на местности с точки зрения минимизации эксплуатационных затрат, исключая вопросы маскировки и боевого управления. Для наглядности на рис. 7–10 показаны результаты применения модели еще для двух переменных: состав ЗИП-О и расстояние на местности между местом размещения ЗИП-ГА и непосредственно ЗРК. Указанное расстояние на графиках выражено через длительность и ресурсоемкость подвоза ЗИП-ГА к месту размещения ЗРК.

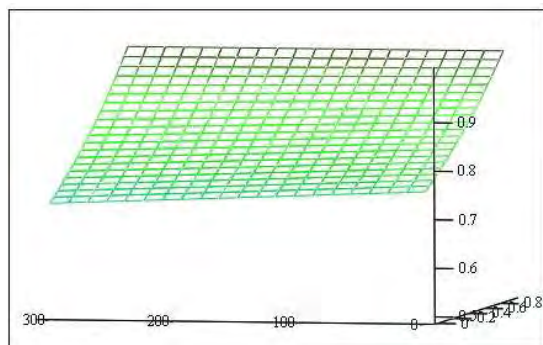


Рис. 7. Зависимость готовности ВВТ от состава ЗИП-О и длительности доставки ЗИП-ГА

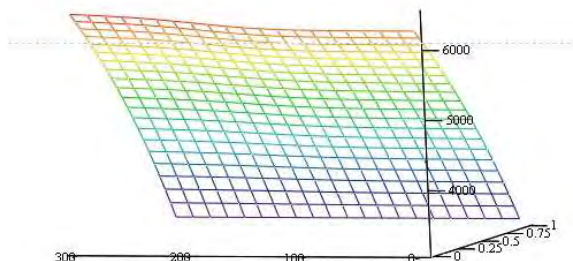


Рис. 8. Зависимость эксплуатационных затрат от состава ЗИП-О и длительности доставки ЗИП-ГА

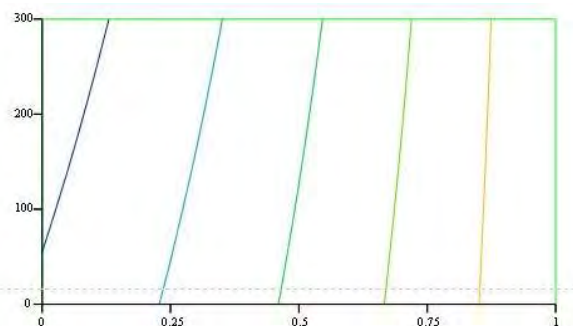


Рис. 9. Проекция зависимости готовности ВВТ от состава ЗИП-О (ось абсцисс) и длительности доставки ЗИП-ГА (ось ординат)

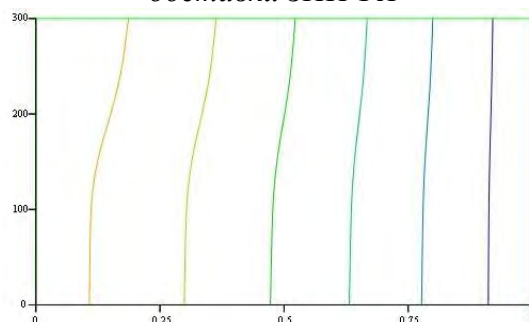


Рис. 10. Проекция зависимости эксплуатационных затрат от состава ЗИП-О (ось абсцисс) и длительности доставки ЗИП-ГА (ось ординат)

Проведенный расчет для одной номенклатуры иллюстрирует применимость методики и возможность получения численного результата. Дальнейшее агрегирование численных показателей для многих номенклатур элементов ЗИП может быть выполнено с помощью известных методик и программных продуктов, в том числе с учетом структурных схем надежности ЗРК и критичности элементов. Использование одного из оптимизационных методов (динамического программирования, нелинейной оптимизации) совместно с моделью позволит обосновать рациональный состав ЗИП ЗРК с учетом условий эксплуатации и тактического построения подразделения либо других показателей системы ТОиР в части, касающейся обеспечения ЗИП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проводится краткий анализ одного из основных документов, регламентирующих порядок формирования системы обеспечения ЗИП образцов вооружения [1]. Рассмотрены основные положения и используемые показатели. Проведена практическая реализация указанных в [1] методик, изложены недостатки и замечания, препятствующие применению методик для формирования комплекта ЗИП зенитного ракетного комплекса.

В статье предложена новая методика и лежащие в ее основе модель готовности зенитно-ракетного комплекса с учетом функционирования системы поставок запасов и модель для расчета затрат на обеспечение функционирования системы обеспечения запасами, которые в отличие от известных позволяют учесть пространственное распределение подразделения ЗРК относительно обслуживающего их группового комплекта ЗИП-Г. Предложенная методика позволяет обосновать выбор наиболее предпочтительного варианта организации обес-

печения ЗИП из множества допустимых. При необходимости, модели из состава методики совместно с одним из методов целочисленной оптимизации могут быть использованы для синтеза оптимальной системы обеспечения ЗИП.

Приведенный пример расчета показывает применимость методики и возможность получения численного результата.

Список используемых источников

1. ГОСТ 27.507–2015. Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов. – М.: Стандартинформ, 2016. – 50 с.
2. ГОСТ РВ 27.3.03–2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. – М.: Стандартинформ, 2005. – 38 с.
3. *Борисов Ю.И.* Основные направления развития вооружения, военной и специальной техники // Оборонно-промышленный комплекс России: федеральный справочник. – 2014. – Т. 10. – С. 211–216. – URL: <http://federalbook.ru/files/opk/Soderjanie/OPK-10III/Borisov.pdf> (дата обращения: 12.07.2018).
4. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
5. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 400 с.
6. *Маричев П.А., Корнев А.С., Хайрулин Р.З.* К оптимальному управлению показателями эффективности парка контрольно-измерительной техники // Вестник МГСУ. – М.: МГСУ, 2017. – № 5 (104). – С. 564–571.
7. *Боровиков И.Г., Щербина И.С.* Моделирование процесса освоения учебного материала личным составом боевого расчета частей запуска космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 659. – С. 194–201.
8. *Дьяков А.Н.* Моделирование системы технического обслуживания и ремонта сложных технических систем ракетно-космических комплексов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 660. – С. 180–189.
9. Вопросы математической теории надежности / Е.Ю.Барзилович, Ю.К.Беляев, В.А.Каштанов, И.Н.Коваленко, А.Д.Соловьев, И.А.Ушаков; под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
10. *Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Решетников Д.В.* Методика выбора стратегии технического обслуживания и ремонта ракетно-космической техники // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/129-21650> (дата обращения: 15.09.2015).
11. ГОСТ 18322–2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 18 с.
12. *Новожилов В.В.* Проблемы измерения затрат и результатов при оптимальном планировании – М.: Наука, 1972. – 434 с.
13. Обеспечение надежности систем гарантированного электропитания наземных комплексов космического назначения методом формализации поиска отказов и выбора минимального множества контролируемых признаков / Д.Р. Абсалямов, Р.Н. Аитов, А.А. Левчук, М.А. Марченко // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 1. – С. 9–14.

Д.И. Казанцев;
А.А. Карытко,
кандидат техн. наук;
Э.А. Родионов

МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, РАЗВЕРНУТЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ

Суть методики заключается в параллельном асинхронном выполнении в среде тестирования группы вычислительных процессов, реализующих следующие алгоритмы обработки данных: прямого и обратного быстрого преобразования Фурье; формирования красно-черного дерева; решения системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты четвертого порядка; LUP разложения матрицы. Вычислительные эксперименты выполнены в среде операционных систем Debian 8, Эльбрус-Д. В работе представлены функции зависимости времени выполнения указанных алгоритмов от размерности исходных данных в нативном режиме в вычислительных системах на базе процессорных архитектур x86-64, e2k, а также в различных средах времени выполнения, развернутых с использованием технологий виртуализации, для x86-64 – kvm, lxc, для e2k – lxc, двоичный транслятор уровня приложений исполняемых кодов программ из кодов x86-64 в коды процессорной архитектуры Эльбрус – e2k. На основе анализа полученных функциональных зависимостей сформирован перечень общих рекомендаций по оценке производительности вычислительных систем, создаваемых на основе рассматриваемых в работе технологий виртуализации.

Ключевые слова: вычислительная система, виртуализация, производительность, процессорная архитектура.

ВВЕДЕНИЕ

В результате развития инфотелекоммуникационных технологий, аппаратных и программных средств сбора, обработки и анализа информации, управления техническими системами, существенно возросла конвергентность технических систем, создаваемых на их основе. Высокая конвергентность требует привлечения широкого спектра специалистов для обслуживания данных систем, надежного сопряжения разнородного программного и аппаратного обеспечения в единый информационный контур сбора и обработки информации. Следствием конвергентности является существенное увеличение ресурсоемкости жизненного цикла информационных систем, снижение показателей надежности процесса их функционирования, рост числа угроз в области информационной безопасности.

Естественным направлением развития процесса по устранению указанных негативных эффектов конвергенции информационных систем явился процесс внедрения в их состав технологии виртуализации [1]. Использование технологий виртуализации позволяет сократить номенклатуру используемого аппаратного обеспечения до одного типа вычислительной платформы, являющейся базовой для построения всей системы, обеспечивает лучшую масштабируемость аппаратного и программного обеспечения, повышение системной надежности и информационной защищенности автоматизированных систем [2].

В качестве базового элемента распределенной системы целесообразно использовать вычислительные модули, построенные на базе мультиядерных систем на кристаллах. Соблюдение данного принципа позволяет приблизить номинальную производительность синтезируемой на базе технологий виртуализации вычислительной системы к пиковым теоретическим значениям.

Таким образом, применение технологий виртуализации в современных вычислительных системах требует дальнейшего совершенствования существующих методов и алгоритмов обоснования производительности вычислительных систем [3–6], при этом особенный интерес представляют собой вопросы оценки эффективности применения технологий виртуализации в современных микропроцессорах семейства «Эльбрус» [7].

ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнение процедуры развертывания управляющих виртуальных машин – гипервизоров подразумевает принятие решения администратором системы о распределении множества *физических* аппаратных ресурсов

$$R = \{M, C, C^*, D\},$$

где M – множество модулей оперативной памяти;
 C – множество универсальных вычислительных ядер;
 C^* – множество специализированных вычислительных ядер;
 D – множество постоянных запоминающих устройств между множеством гостевых хостов H .

Гостевой хост $h \in H$ представляет собой абстракцию вычислительной системы $\{m, c, c^*, d\}$, обеспечивающей одновременный запуск нескольких независимых вычислительных сред времени выполнения на базе элементов множества R . На элементы h накладывается система ограничений: $\sum_{h \in H} h_i \leq i$, где $i \in R$.

Оценка эффективности процесса функционирования системы, синтезируемой на базе технологий виртуализации, требует совершенствования существующего научно-методического аппарата структурно-параметрического синтеза вычислительных систем специального назначения [3, 5], обеспечивающего учет влияния на показатели качества функционирования вычислительных систем технологий виртуализации [4, 6].

Конфигурация классического хоста (синтезируемого без использования технологий виртуализации) определяет некоторую функцию времени решения задачи $z: t(z; h)$, $z \in Z$, Z – множество задач, решаемых хостом h . В случае применения технологий виртуализации среды времени выполнения хостов h_1, h_2, \dots, h_n , оказывают взаимное влияние на значение соответствующих функций $\tilde{t}(z; h)$, т. е., как правило, $\tilde{t}(z; h) \neq t(z; h)$, так что в большинстве случаев справедливо неравенство

$$\sum_{h=1}^n \sum_{z=1}^{|Z|} \tilde{t}(z; h) \geq \sum_{h=1}^n \sum_{z=1}^{|Z|} t(z; h).$$

Основной причиной нарушения равенства времени выполнения задач являются [8]:

- 1) возникновение так называемого эффекта «гонки» за вычислительные ресурсы системы между вычислительными процессами;
- 2) несоответствие программной реализации алгоритма решения задачи z используемой базовой процессорной архитектуре;
- 3) несоответствие варианта распределения аппаратных ресурсов между гостевыми хостами архитектуре памяти вычислительной системы;
- 4) неоптимальность распределения вычислительной нагрузки между гостевыми хостами.

С учетом сказанного решением задачи синтеза распределенной вычислительной системы на основе технологии виртуализации будем считать такую конфигурацию системы $h \in H$, для которой выполняется критерий

$$t_h = \min \left[\max \sum_{h=1}^n \sum_{z=1}^{|Z|} \tilde{t}(z; h) \right]. \quad (1)$$

Цель данной работы заключается в проведении анализа методов, обеспечивающих решение задачи (1).

Решение задачи (1) требует формирования множества тестовых задач Z , обеспечивающего наиболее полное и достоверное покрытие спектра задач, решаемых синтезируемой вычислительной системой.

Без потери общности в качестве объекта исследования будем рассматривать вычислительные комплексы, применяемые в составе автоматизированных систем мониторинга околоземного космического пространства. Наиболее характерными и в то же время ресурсоемкими задачами данных систем являются задачи:

- 1) обработки радиолокационной и оптической координатной и некоординатной информации;
- 2) прикладной баллистики;
- 3) поиска информации в специальных структурах данных.

Указанные задачи декомпозируются на ряд типовых алгоритмов обработки данных, например: нахождения матрицы обратной заданной; спектрального анализа изображений и сигналов; решения систем дифференциальных уравнений; обхода списков, обладающих различной временной и пространственной локальностью данных. На основе перечисленных задач формируется множество

$$Z' = \{z_1, z_2, z_3, z_4\},$$

- где
- z_1 – алгоритм поиска для заданной матрицы A обратной матрицы A^{-1} , такой, что $AA^{-1} = E$ с применением метода LUP разложения матрицы;
 - z_2 – алгоритм, реализующий быстрое преобразование Фурье;
 - z_3 – алгоритм, реализующий метод Рунге – Кутты четвертого порядка для решения системы дифференциальных уравнений;
 - z_4 – алгоритм реализующий синтез структуры данных красно-черного дерева.

В работе рассматривается два типа процессорных архитектур: $x86$ – 64-битная архитектура intel и $e2k$ – архитектура с широким командным словом на базе процессора семейства «Эльбрус» с третьей версией системы команд [7].

МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛИЗАЦИИ

В методике используется множество исполняемых файлов формата ELF $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$, где f_1, f_2, f_3, f_4 – программы, реализующие элементы множества алгоритмов Z' соответственно; f_5 – специальная программа диспетчер, управляющая процессом тестирования. Аргументы программы f_5 характеризуются множеством $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, где a_1 – размер полинома Фурье, a_2 – размер матрицы, используемой в тесте LUP разложения, a_3 – число потоков (нитей), реализующих алгоритм z_3 , a_4 – число вершин красно-черного дерева. Программная реализация алгоритмов на языке программирования C++ соответствует псевдокоду, представленному в работе [9].

Методика состоит из последовательного выполнения следующих шагов.

Шаг 1. Программа-диспетчер – процесс f_5 инициализирует счетчик числа выполнения тестов i , $i = 10$.

Шаг 2. Процесс f_5 последовательно выполняет два системных вызова $fork()$. Результатом выполнения данного шага является создание трех дочерних процессов клонов – f_5^1, f_5^2, f_5^3 ,

т. е., после выполнения данного шага в среде времени выполнения присутствует четыре процесса $\{f_5, f_5^1, f_5^2, f_5^3\}$.

Шаг 3. С применением связки системных вызовов $fork()$, $execl()$ процессы $\{f_5, f_5^1, f_5^2, f_5^3\}$ производят асинхронный последовательный запуск каждым процессом десяти дочерних процессов, реализующих исполняемый код файлов f_1, f_2, f_3, f_4 с аргументами $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$. Таким образом обеспечивается возникновение режима гонки вычислительных процессов за аппаратные ресурсы вычислительной системы.

Шаги 1–3 выполняются для комбинаций исходных данных, представленных в табл. 1.

Шаг 4. Для каждой программы f_1, f_2, f_3, f_4 и соответствующих значений аргументов a_1, a_2, a_3, a_4 рассчитывается минимальное t_{\min} , среднее t^* и максимальное t_{\max} время выполнения теста.

Таблица 1

Исходные данные процедуры тестирования производительности

№ теста	a_1	a_2	a_3		a_4
			x86	e2k	
1	2048	512	12	16	500000
2	4096	1024	12	16	1000000
3	8192	1536	12	16	1500000
4	16384	2048	12	16	2000000

Здесь x86, e2k – типы процессорных архитектур, используемых для построения конфигураций сред времени выполнения тестов.

Шаг 5. Результаты шага 4 аппроксимируются полиномом третьей степени, коэффициенты которого рассчитываются с использованием метода наименьших квадратов, таким образом, обеспечивается аналитическое представление зависимости времени выполнения программы от размерности исходных данных $t(a_{ij}|f_i)$, где i – номер программы, j – номер теста.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Вычислительный эксперимент проводился в трех средах времени выполнения для каждого вида процессорной архитектуры – x86 и e2k, краткая характеристика данных сред представлена в табл. 2.

Обработанные результаты применения описанной методики представлены на рис. 1–7.

Здесь используются следующие условные обозначения: host – нативная производительность базовой вычислительной системы без использования виртуализации; lxc – производительность вычислительной системы в среде lxc-контейнера [10]; kvm – производительность вычислительной системы в среде гипервизора.

Данные, представленные на рисунках, хорошо согласуются с априорными представлениями о влиянии рассматриваемых видов виртуализации на производительность вычислительной системы. Например, под управлением гипервизора kvm тест выполнялся на 25% дольше по сравнению со временем его выполнения без использования средств виртуализации, использованием lxc-контейнеров привело к среднему увеличению времени работы теста на 2%. Увеличение времени работы теста в среде гипервизора обусловлено не только дополнительными затратами производительности системы на работу виртуальной машины, но и иным

распределением аппаратных ресурсов между вычислительными процессами в режиме гонки диспетчерами хостовой операционной системы, гипервизора и гостевой операционной системы.

Таблица 2

Характеристика вариантов среды времени выполнения тестов

Архитектура процессора	Управляющая ОС	Вид виртуализации	Гостевая ОС	Количество вычислительных ядер	Тактовая частота процессора (ГГц)
x86	Debian Jessie	отсутствует	отсутствует	12	2,6
x86	Debian Jessie	kvm	Debian Jessie	12	2,6
x86	Debian Jessie	lxc-контейнер	Debian Jessie	12	2,6
e2k	Эльбрус-Д	отсутствует	отсутствует	16	0,75
e2k	Эльбрус-Д	lxc-контейнер	Debian Jessie	16	0,75
e2k	Эльбрус-Д	двоичный транслятор уровня приложений x86_64	Debian Jessie	16	0,75

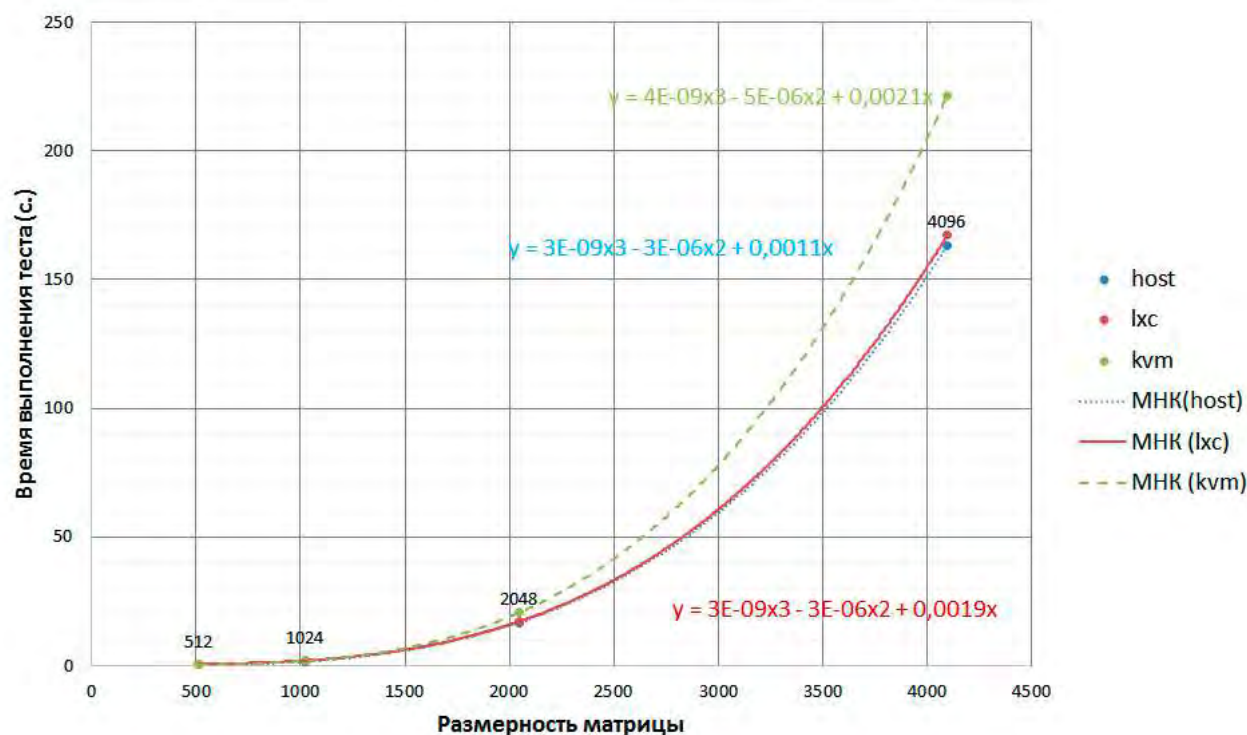


Рис. 1. Зависимость среднего времени выполнения LUP разложения матрицы от размера исходной матрицы (x86)

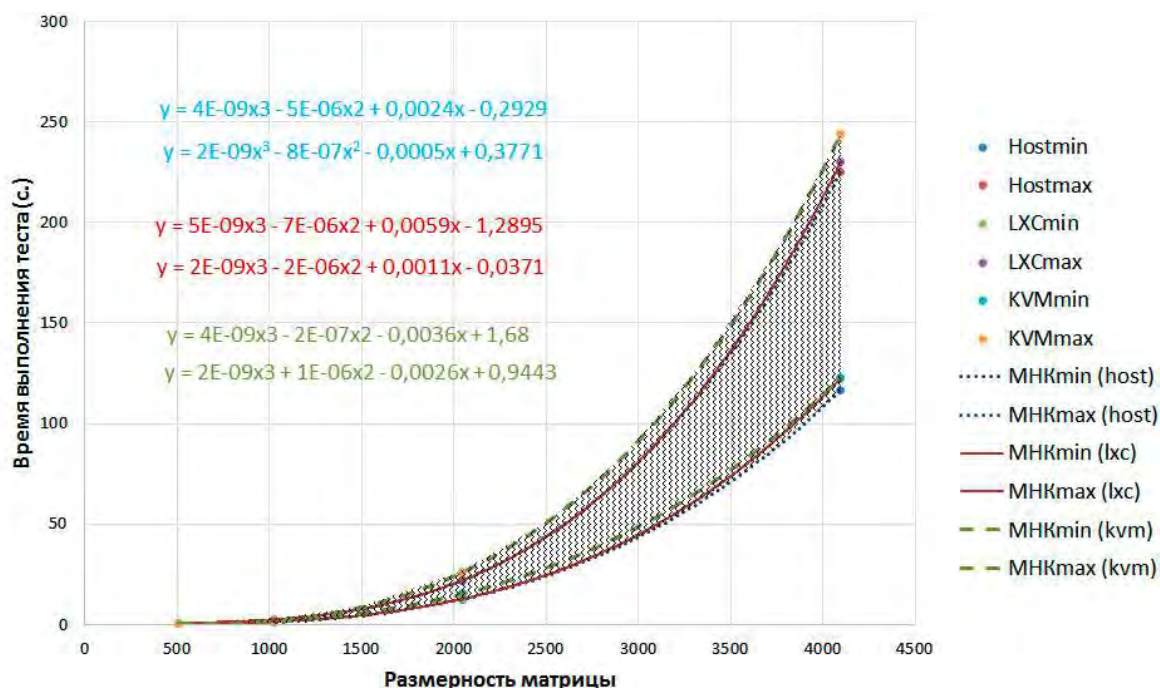


Рис. 2. Зависимость минимального и максимального времени выполнения LUP разложения матрицы от размера исходной матрицы (x86)

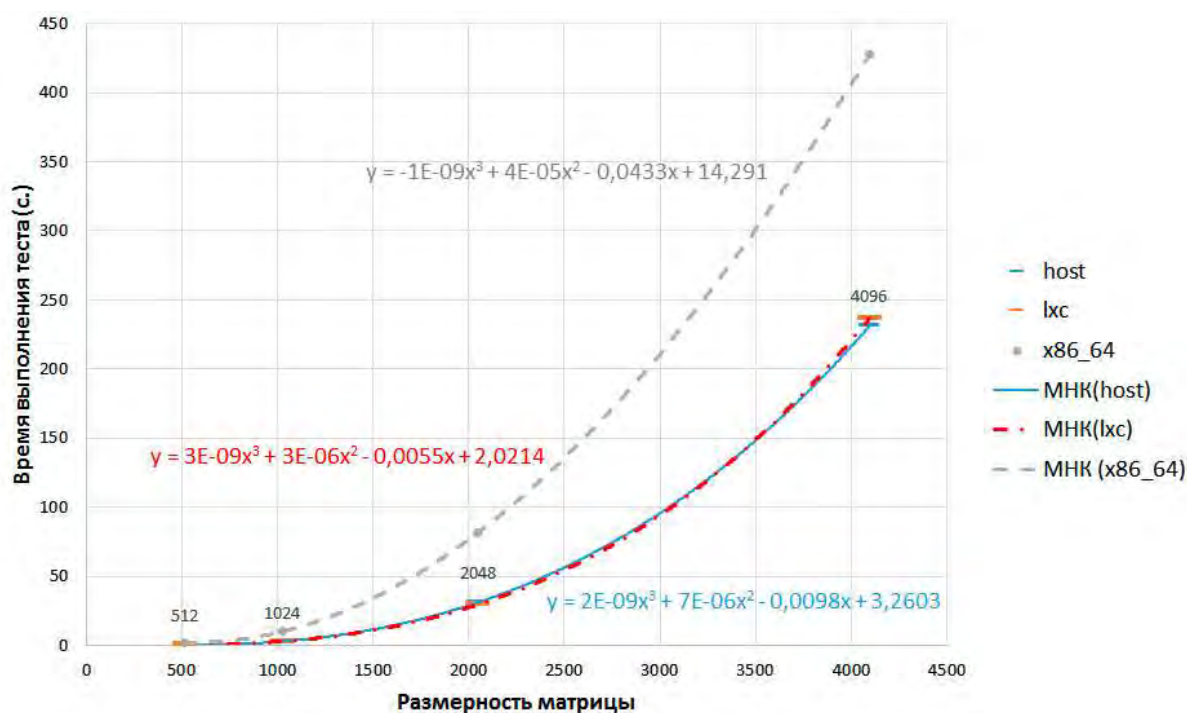


Рис. 3. Зависимость среднего времени выполнения LUP разложения матрицы от размера исходной матрицы (e2k)

Условное обозначение x86_64 характеризует время работы теста под управлением двоичного транслятора [11] уровня приложений.

На рис. 4, 5 представлена зависимость времени выполнения быстрого прямого и обратного преобразования Фурье от степени полинома для вычислительных средств на базе процессорных архитектур x86 и e2k соответственно.

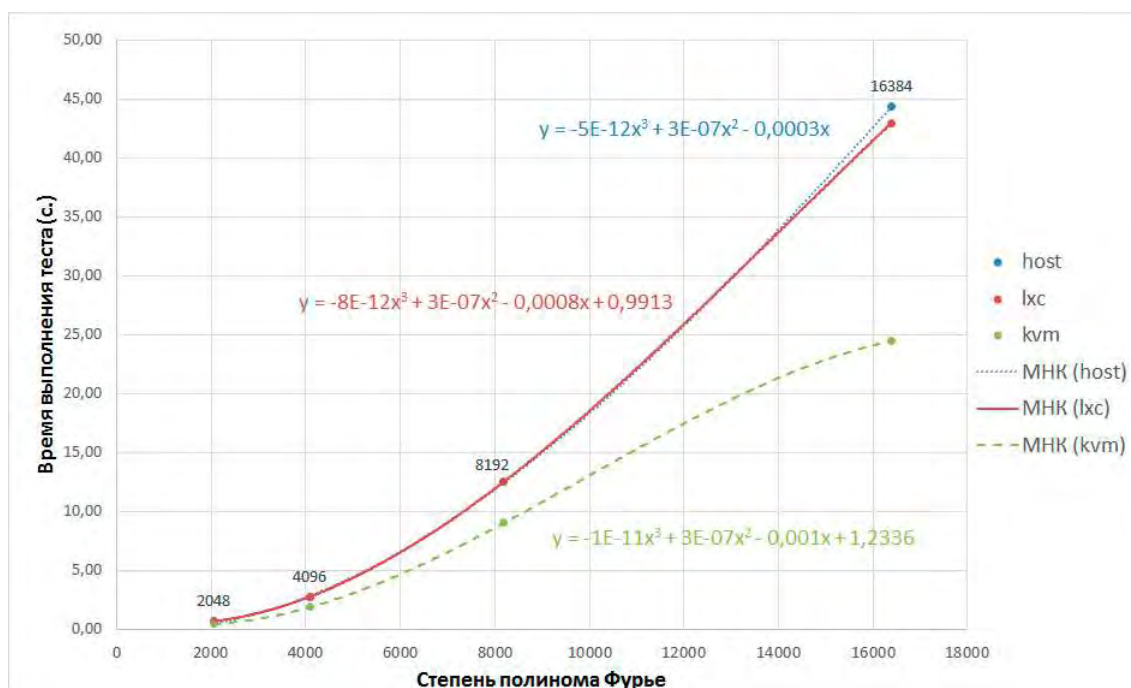


Рис. 4. Зависимость среднего времени выполнения быстрого преобразования Фурье от степени полинома (x86)

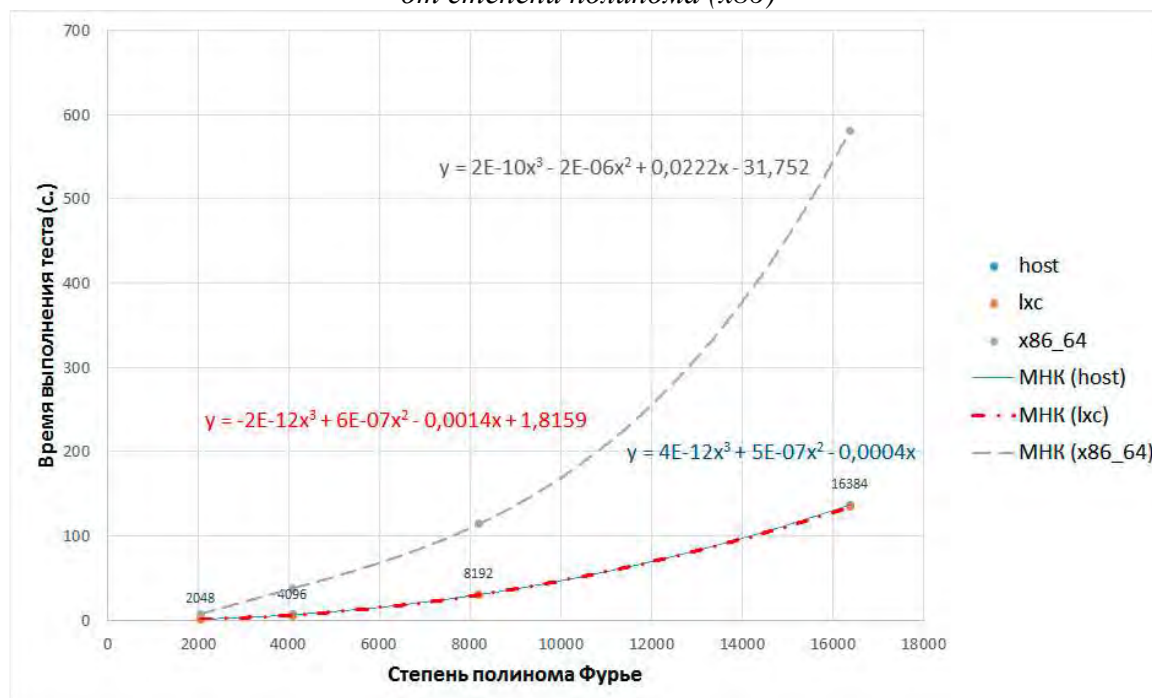


Рис. 5. Зависимость среднего времени выполнения быстрого преобразования Фурье от степени полинома (e2k)

Более быстрое выполнение теста в среде гипервизора kvm обусловлено выделением данному процессу большего числа аппаратных ресурсов упомянутыми выше планировщиками. Следствием данного факта является существенное увеличение времени работы остальных тестов в гостевой операционной системе гипервизора kvm. Применение двоичного транслятора уровня приложения в случае с быстрым преобразованием Фурье приводит к четырехкратному увеличению времени работы программы, что свидетельствует о том, что региональный компилятор не оптимально использовал аппаратные возможности процессора для выполнения двоичного кода исполняемого файла для процессорной архитектуры x86.

Функции зависимости времени выполнения теста по созданию красно-черного дерева от числа вершин для рассматриваемых процессорных архитектур представлены на рис. 6, 7.

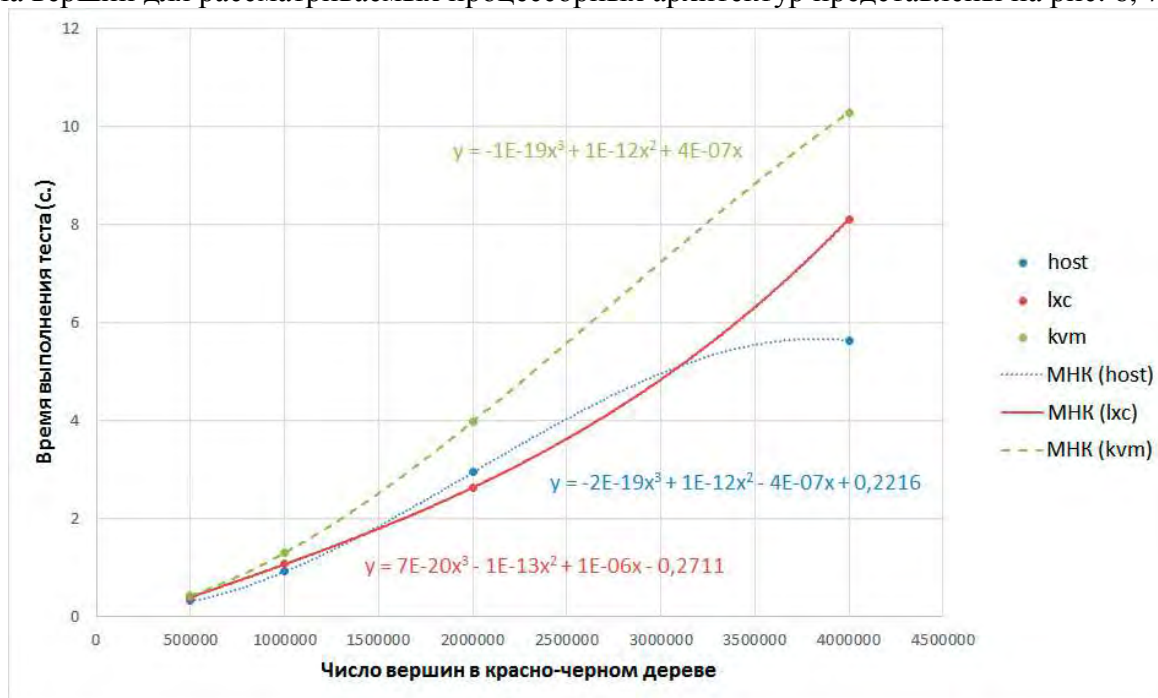


Рис. 6. Зависимость среднего времени выполнения создания красно-черного дерева от числа вершин в нем (x86)

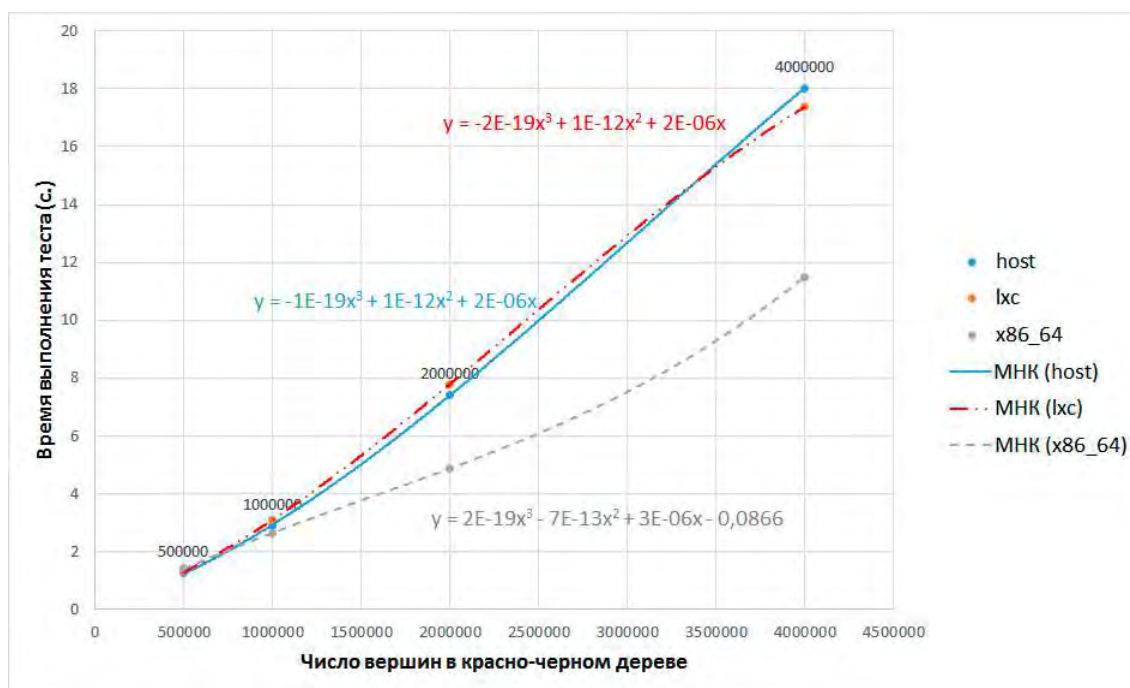


Рис. 7. Зависимость среднего времени выполнения создания красно-черного дерева от числа вершин в нем (e2k)

Процедура создания красно-черного дерева характеризуется гораздо меньшей пространственной и временной локальностью данных, чем рассматриваемые выше алгоритмы обработки данных, следствием данного факта является большее влияние на производительность вычислительной системы архитектуры памяти вычислительной системы, ее пропускной спо-

собности, объема регистровой памяти и кэш-памяти процессора, используемых механизмов аппаратного и программного префетчинга данных, алгоритмов работы диспетчера памяти в операционной системе. Указанные ограничения естественным образом оказывают свое влияние на время выполнения теста в процессорной архитектуре x86 – использование диспетчера памяти гипервизора увеличивает время загрузки необходимых данных в регистровую память микропроцессора. Размер регистрового файла в процессоре intel начинает оказывать существенное влияние на время выполнения теста в среде lxc-контейнера при создании красно-черного дерева максимального размера. При использовании lxc-контейнера в вычислительной системе на базе процессорной архитектуры e2k существенных отличий времени выполнения теста от времени его выполнения в нативном режиме не наблюдается. Напротив, двоичный транслятор уровня приложений выполнил существенную оптимизацию уровня команд исполняемого файла в кодах x86_64 в результате чего время выполнения теста существенно сократилось.

Результаты выполнения многопоточного теста на решение системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Среднее время выполнения многопоточного теста

Вид виртуализации	Число создаваемых потоков		Среднее время выполнения теста (с)	
	x86	e2k	x86	e2k
отсутствует	12	16	9,27	37,4
kvm			8,34	–
lxc-контейнер			9,44	37,8
двоичный транслятор уровня приложений x86_64			–	120,1

Длительность суммарного времени выполнения всех вышеописанных тестов в вычислительной среде, функционирующей под управлением гипервизора kvm, превысила на 13% и 10% длительность выполнения тестов в хостовой операционной системе и lxc-контейнере соответственно.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, СОЗДАВАЕМЫХ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ

Применение в вычислительной системе lxc-контейнеров не приводит к существенному изменению производительности синтезируемой вычислительной системы. Основным назначением lxc-контейнера является изоляция группы процессов от окружения хостовой операционной системы, при этом окружение контейнера работает под управлением ядра хостовой операционной системы. Таким образом, фактически ядро хостовой операционной системы управляет ресурсами и процессами обоих вычислительных сред. В случае, если вычислительный процесс обладает высокой временной и пространственной локальностью данных, производительность lxc-контейнера не будет отличаться от производительности хостовой вычислительной среды более чем на 2%.

Применение kvm подразумевает организацию взаимодействия ядер хостовой и гостевой операционных систем по средствам интерфейса гипервизора, следствием данного факта является увеличение времени работы диспетчеров памяти обоих операционных систем, увеличенное время смены контекста исполняемого процесса на процессоре в обоих ядрах операционных систем. Указанные факторы на некоторых тестовых задачах могут проявлять-

ся в снижении до 20% нативной производительности вычислительной системы синтезируемой с использованием технологий виртуализации.

Среднеквадратичное отклонение времени выполнения процессов, обладающих высоким темпом вычислений, т. е. находящихся большую часть времени в состоянии «готов», в гостевой операционной системе меньше аналогичного показателя в хостовой операционной системе на 5–10% и напротив, среднеквадратичное отклонение времени выполнения процессов, находящихся большую часть времени в состоянии «ожидая» в гостевой операционной системе выше аналогичного показателя в хостовой операционной системе на 8–12%.

Темп выполнения операций вычислительным процессом в пространстве пользователя ограничивается быстродействием ядра микропроцессора, данные операции имеют нулевые накладные расходы на виртуализацию. Выполнение операций ввода-вывода, аллокации памяти, создания процессов, как правило, основывается на использовании системных вызовов ядра операционной системы, обработка которых происходит в пространстве ядра, что приводит к увеличению накладных расходов на виртуализацию. Эти затраты определяются количеством команд, которые должны эмулироваться в среде гипервизора, и временем эмуляции каждой из них.

Таким образом, универсальная рекомендация по обеспечению выполнения критерия (1) с использованием технологий виртуализации заключается в минимизации запуска в окружении виртуальных машин вычислительных процессов, базовые операции которых требуют выполнения двоичного кода программ в пространстве ядра – системные вызовы ядра операционной системы, обработчики прерываний.

Эффективность работы двоичного транслятора серьезно зависит от характеристик исполняемого кода программы и требует детального анализа производительности программ в каждом отдельном случае [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение эффективной эксплуатации современных вычислительных систем на базе различных технологий виртуализации требует при использовании современного научно-методического аппарата синтеза вычислительных систем учета взаимного влияния типовых решаемых задач на среднее время их выполнения в окружениях, развернутых на базе технологий виртуализации [1, 2, 4, 10].

Применение технологий виртуализации способствует снижению достоверности результатов, формируемых существующими аналитическими моделями вычислительных процессов. Результаты, получаемые в ходе применения предложенной методики, возможно использовать при формировании варианта начального приближения распределения вычислительной нагрузки между элементами синтезируемой распределенной вычислительной системы. Дальнейшая оптимизация использования аппаратных ресурсов системы должна обеспечиваться средствами динамической реконфигурации виртуальных машин в процессе их функционирования и планирования распределения нагрузки между ее элементами. Решение данной задачи обеспечивается применением алгоритмов построения моментального состояния распределенной системы, а также алгоритмов стабилизации вычислительного процесса.

Список используемых источников

1. Квасницкий В.Н., Журавлева Т.Б. Использование технологии виртуализации при создании информационных систем // Вестник РГГУ. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2012. – № 10 (90). – С. 162–169.

2. Применение технологии виртуализации и создание универсальной основы построения автоматизированных систем управления / Ю.В. Безгодков, Г.Б. Гуров, Ю.Б. Лепихин, С.Ф. Семин // Вестник воздушно-космической обороны. – 2017. – № 1 (13). – С. 107–117.
3. Гончаренко В.А. Метод обоснования производительности информационно-вычислительных систем реального времени с учетом неопределенности параметров // Тр. Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 128–133.
4. Клеменков П.А. Оценка производительности программного обеспечения в виртуализованном окружении на основе атомарных тестов // Труды Института системного программирования РАН. – 2011. – Т. 21. – С. 133–140.
5. Обоснование производительности вычислительных систем при решении группы неоднородных задач / В.А. Гончаренко, А.С. Дудкин, В.А. Максимов, В.В. Ширококов // Естественные и технические науки. – 2016. – №8 (98). – С. 79–81.
6. Гончаренко В.А., Казанцев Д.И. Актуальные проблемы моделирования конфигураций объектов виртуальной среды единого информационного пространства // Информация и космос. – 2018. – № 3. – С. 89–95.
7. Знаменский Д.В. Выбор варианта реализации средств аппаратной поддержки виртуализации архитектуры «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. – 2014. – Т. 4, № 3. – С. 64–73.
8. Хенесси Д.Л., Паттерсон Д.А. Компьютерная архитектура. Количественный подход. – 5-е изд. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 936 с.
9. Кормен Т., Лейзерсон Ч.Е., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2013. – 1328 с.
10. Баранов А.В., Николаев Д.С. Использование контейнерной виртуализации в организации высокопроизводительных вычислений // Программные средства: теория и приложения. – 2016. – № 1 (28). – С. 117–134.
11. Родзевич С.А. Аппаратная поддержка двоичной трансляции x86 вещественной арифметики в процессорах «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 2. – С. 59–64.

Е.В. Калмыков

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛИ ПОДСИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ В ГОТОВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

В процессе эксплуатации электромеханического оборудования возникает необходимость проведения мероприятий по поддержанию работоспособности данного оборудования и корректировке режимов технического обслуживания и ремонта с учетом их фактического состояния. В данной публикации авторы рассматривают задачу по подбору оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта для технических систем, в состав которых входит электромеханическое оборудование.

Ключевые слова: технические системы, электромеханическое оборудование, техническое обслуживание, ремонт, работоспособность, ресурс, отказ.

Характерной особенностью технических систем [далее будем рассматривать только технические системы (ТС), в состав которых входит электромеханическое оборудование] является то, что ввод их в эксплуатацию осуществляется раньше технологического оборудования с одной стороны, а назначенный ресурс (срок службы) значительно ниже – с другой. Данное обстоятельство предопределяет более ранний переход на поддержание в готовности электромеханического оборудования по фактическому техническому состоянию. Для реализации этого необходимо выполнить как анализ эффективности существующих работ по поддержанию готовности, так и анализ дополнительных, направленных на поддержание работоспособности/исправности элементов, обслуживание которых не предусмотрено эксплуатационной документацией. На основе анализа необходимо предложить режимы обслуживания (ремонта) системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) обеспечивающие требуемый коэффициент готовности.

Целью ТО и Р, в соответствии с [1], является поддержание и восстановление работоспособного или исправного состояния изделий военной техники.

Поскольку система ТО и Р включает средства обслуживания изделий, исполнителей, документацию, подсистему материально-технического обеспечения и не может быть проанализирована в объеме статьи, остановим свое внимание на режимах ТО и Р.

Под режимами ТО и Р будем понимать совокупность взаимоувязанных видов, форм организации обслуживания и ремонта агрегата (системы) с учетом заданных условий эксплуатации, которые отражены в эксплуатационной и/или ремонтной документации.

Основной характеристикой изделий электромеханического оборудования как объекта ТО и Р является ремонтпригодность. С другой стороны, потребность изделия в ТО и Р характеризуется видом изделия и определяется в комплексе с параметрами надежности. Очевидно, что приспособленность изделия к выполнению работ ТО и Р должна определяться потребностью каждого изделия в выполнении этих работ.

Формирование режимов ТО и Р предусматривает реализацию следующих этапов.

На первом этапе проводится анализ элементов ТС по приспособленности к проведению работ по поддержанию и восстановлению работоспособности/исправности по следующим свойствам:

- эксплуатационная технологичность – приспособленность ТС к выполнению работ технического обслуживания;
- ремонтная технологичность – свойство конструкции ТС, характеризующее ее приспособленность к выполнению при техническом обслуживании (ремонте) работ по поддержанию и (или) восстановлению надежности;

– контролепригодность – свойство ТС, характеризующее ее приспособленность к проведению работ по контролю (диагностированию) технического состояния заданными средствами.

Очевидно, что элементы могут быть как обслуживаемые, так и необслуживаемые, но относительно потребности в работах по поддержанию и восстановлению надежности могут быть выделены следующие категории:

I – невосстанавливаемые несменяемые элементы, которые с заданной вероятностью вырабатывают ресурс (срок службы) до списания системы;

II – невосстанавливаемые сменяемые элементы, которые с заданной вероятностью требуют периодической замены при отработке ресурса (срока службы) до списания системы;

III – восстанавливаемые несменяемые элементы, которые с заданной вероятностью вырабатывают ресурс (срок службы) до списания системы при условии периодического восстановления;

IV – восстанавливаемые сменяемые элементы, которые с заданной вероятностью требуют периодического восстановления и периодической замены при отработке ресурса (срока службы) до списания системы.

Применение данной классификации обеспечивает ранжирование требований к ТС как объектам ТО и Р по видам, группам и категориям элементов, которые определяют потребность в выполнении различных видов целевых работ ТО и Р и, соответственно, формируют требования по приспособленности системы к этим работам.

На втором этапе проводится анализ элементов ТС по следующим конструктивно-эксплуатационным свойствам [2]:

1) влияние отказов элементов на безопасность и результативность применения системы;

2) характер изменения показателей надежности (интенсивности отказов) элементов от наработки.

Анализ влияния первой группы конструктивно-эксплуатационных свойств при формировании вариантов режимов ТО и Р учитывает возможности видов и режимов обслуживания и ремонта элементов системы по обеспечению безопасности и результативности.

Результатом выполнения второго этапа будет разбиение категорий элементов ТС на подкатегории в соответствии с рассмотренными свойствами и назначение элементам предварительных режимов ТО и Р [3].

На третьем этапе проводится анализ работ ТО и Р, которые необходимо сформировать для элементов системы в соответствии с их свойствами, проанализированными выше.

Поскольку режимы ТО и Р определяют использование ТС по назначению и поддержанию в готовности к применению, что было показано выше, то применительно к решаемым задачам приемлемой является следующая классификация работ в системе ТО и РТС.

По целевому назначению все работы ТО и Р можно разделить на три группы:

1) работы, направленные на контроль технического состояния;

2) технологические работы;

3) работы, направленные на поддержание и восстановление работоспособности;

На основании вышеизложенного сведем характеристики ТС в блок-схему (рис. 1).

Работы по контролю технического состояния обеспечивают определение фактического технического состояния изделий для принятия альтернативных решений об исправности или неисправности системы в целом.

Работы по поддержанию и восстановлению работоспособности или исправности обеспечивают свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации.

Технологические работы обеспечивают подготовку системы к использованию по назначению, стоянке, хранению или приведению его в исходное состояние после этих процессов, а также обеспечивают выполнение работ по обеспечению надежности, и не связаны с работоспособностью/исправностью.

Работы по контролю технического состояния могут быть выполнены визуальным контролем, при возможности – инструментальным, приборным и т. д.



Рис. 1. Блок-схема анализа приспособленности объекта к ТО и Р

Работы по поддержанию и восстановлению работоспособности или исправности элементов системы будут определяться материалами их конструкции и физическими процессами их функционирования, и могут также быть выполнены различными способами вплоть до полной замены. Окончательное решение о включении перечня работ и способов выполнения ТО и Р в режим обслуживания (РО)ТС будем принимать с учетом их стоимости (С) и оперативности (рис. 2).

В результате выполнения третьего этапа будет определено множество работ ТО и Р 1) и 3) для элементов ТС с учетом их свойств и работы 2) для системы в целом.

На четвертом этапе проводится оптимизация режимов ТО и Р и формирование регламентных работ по поддержанию и восстановлению надежности ТС.

В общем виде задачу синтеза оптимального сочетания работ ТО и РТС можно сформулировать следующим образом: необходимо сформировать режим ТО и Р, позволяющий обеспечить требуемый коэффициент готовности системы при минимальных затратах на реализацию работ ТО и Р при известных структуре технологического оборудования ТС РКК (виды, системы, их элементы и связи между ними), множестве работ 1) и 3) и технологии их реализации, номенклатуре инструментальных средств измерения и характеристиках его достоверности, значениях показателей безотказности и ремонтпригодности элементов ТС и затратах, характеризующих реализацию работ на элементах ТС.

Приведем формальную постановку задачи.

Дано:

$[\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*, \dots, \bar{x}_i^*, \dots, \bar{x}_l^*]$ – множество работ ТО и Р, направленных на контроль технического

состояния и на поддержание/восстановление работоспособности/исправности элементов системы наземного технического оборудования (НТО) с учетом их свойств, которые возможно выполнить на элементе системы НТО ТС;

C_{ijkv} – множество стоимостей реализации v -й работы на k -м элементе j -й системы i -го вида, учитывающих затраты на разработку (приобретение), внедрение (размещение) и обслуживание средств контроля технического состояния;

C_{\max} – располагаемое количество материальных ресурсов.

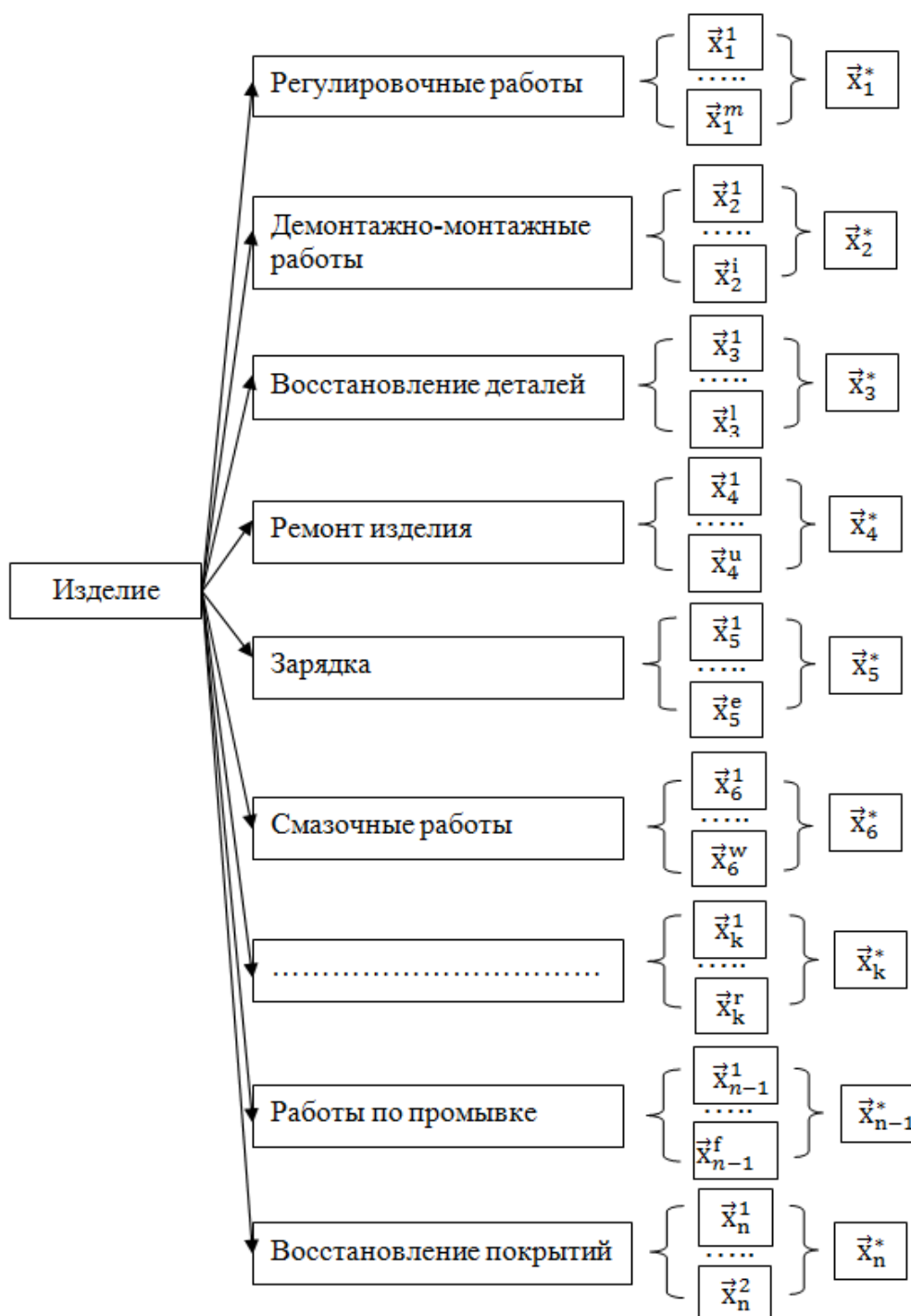


Рис. 2. Схема формирования регламентных работ ТС

Требуется определить стратегию – вектор \vec{x}^* индивидуальных режимов управления техническим состоянием элементов систем технологического оборудования, позволяющих обеспечить требуемый коэффициент готовности ТС при минимальных затратах на реализацию работ ТО и Р.

Найти:

$$C_{\Sigma} = c_{\min}, c_{\min} + \Delta c, \dots, c_{\max};$$

$$\bar{x}^* = \arg \max_{\bar{x} \in \Delta} K_{\Gamma};$$

где $\bar{x}^* = [\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*, \dots, \bar{x}_i^*, \dots, \bar{x}_I^*]^T$;

$$\bar{x}_i^* = [\bar{x}_{i1}^*, \bar{x}_{i2}^*, \dots, \bar{x}_{ij}^*, \dots, \bar{x}_{iJ}^*]^T;$$

$$\bar{x}_{ij}^* = [\bar{x}_{ij1}^*, \bar{x}_{ij2}^*, \dots, \bar{x}_{ijk}^*, \dots, \bar{x}_{ijK}^*]^T;$$

$$\bar{x}_{ijk}^* = [\bar{x}_{ijk1}^*, \bar{x}_{ijk2}^*, \dots, \bar{x}_{ijkv}^*, \dots, \bar{x}_{ijkV}^*]^T;$$

$$\Delta = \left\{ \bar{x} \mid C_{\Sigma}(\bar{x}) \leq C_{\max}, x_{ijkv} \in \{0, 1\}, \sum_{v=1}^{v_{ijk}} x_{ijkv} \in \{0, 1\} \right\};$$

$$C_{\Sigma}(\bar{x}) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_v (x_{ijk1} \cdot c_{ijk1} + x_{ijk2} \cdot c_{ijk2} + \dots + x_{ijkv} \cdot c_{ijkv}).$$

С учетом того, что коэффициент готовности является мультипликативной функцией, для нахождения его зависимости от режимов ТО и Р может быть использован аппарат динамического программирования, если производить оптимизацию по одному показателю, а другой представить в виде ограничения. Фактически решение основной задачи сводится к последовательному отысканию оптимального по суммарным эксплуатационным затратам сочетанию режимов ТО и Р для элементов систем, систем, видов систем и всего РКК.

В случае наличия в перечне работ ТО и Р альтернативных вариантов по достижению требуемого коэффициента готовности и ограничения на ресурсы, выделяемые на достижения приемлемого уровня надежности, должны быть записаны в виде

$$\Delta K_{\Gamma} = \sum_{i=1, j=1}^{I, J} \Delta K_{\Gamma_{ij}} (x_{ij1} c_{ij1} + \dots + x_{ijk} c_{ijk} + \dots + x_{ijK} c_{ijK}),$$

$$\forall i, j, k, v, x_{ijkv} \in \{0, 1\}, \sum_{i=1, j=1}^{I, J} x_{ijkv} \in \{0, 1\},$$

$$\sum_{i=1, j=1}^{I, J} (x_{ij1} c_{ij1} + \dots + x_{ijk} c_{ijk}) \leq C_{IJ}.$$

Дано: зависимости $\Delta K_{\Gamma_{ij}}(c_{ij})$.

Найти: для $\forall i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}, v = \overline{1, V}$ и $C_{ij} = c_{ij1}^{\min}, c_{ij1}^{\min} + \Delta c_{ij1} c_{ij1}^{\min} + \Delta c_{ij2}, \dots, c_{ij}^{\max}$,

$$\bar{x}_{ij}^* = \arg \max_{\bar{x}_{ij}} \sum_{i=1, j=1}^{I, J} \Delta K_{\Gamma_{ij}} (x_{ij1} c_{ij1} + \dots + x_{ijk} c_{ijk}) \text{ при условии, что } \sum_{i=1, j=2}^{I, J} (x_{ij1} c_{ij1} + \dots + x_{ijk} c_{ijk}) \leq C_{ij},$$

где \bar{x}_{ij}^* – вектор, характеризующий оптимальный объем работ по достижению требуемого коэффициента готовности при реализации работ на k -м элементе j -й системы i -го вида, $\bar{x}_{ij}^* = [\langle x_{ij1}^*, x_{ij2}^*, \dots, x_{ijk}^* \rangle]^T$. Каждому элементу x_{ijk}^* , равному 1, соответствует работа r_{ijk} , а элементы x_{ijk}^* , равные нулю, указывают на то, что соответствующие им работы не целесообразно выполнять при данном уровне финансирования C_{ij} . Δc_{ij} – точность распределения средств по работам, направленным на достижение требуемого коэффициента готовности j -й системы i -го вида,

$$c_{ij1}^{\min} = \min_i \min_j c_i, \quad c_{ij}^{\min} = \sum_i \max_j c_i.$$

Так как задача решается для спектра значений C_{ij} , то в результате ее решения получим не только оптимальный объем работ по достижению требуемого коэффициента готовности, но и дискретную функцию $\Delta K_{r_{ij}}(C_{ij})$, характеризующую чувствительность коэффициента готовности j -й системы i -го вида к вложению средств по повышению надежности при реализации v -й работы на k -м элементе.

Решением первого шага этой задачи будет уравнение Беллмана:

$$\Delta \tilde{K}_{r_{ij}}(\xi_{ij1}) = \Delta K_{r_{ij1}}(c_{ij}^{\min}), \quad \forall \xi_{ij1} < c_{ij}^{\min}, \quad \Delta \tilde{K}_{r_{ij}}(\xi_{ij1}) = 0, \quad (1)$$

а для последующих

$$\Delta \tilde{K}_{r_{ij}}(\xi_{ijk}) = \max_{\langle x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijk} \rangle} \left(\Delta \tilde{K}_{r_{ij}} \left(\sum_{k=1, v=1}^{K, V} x_{ijk} c_{ijk} \right) + \Delta \tilde{K}_{r_{ij}(k-1)} \left(\xi_{ijk} - \sum_{k=1, v=1}^{K, V} x_{ijk} c_{ijk} \right) \right), \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V x_{ijk} c_{ijk} \leq \xi_{ijk}, \quad \xi_{1j} = 0, \quad c_{ij}^{\min}, c_{ij}^{\min} + \Delta c_{ij1}, \quad c_{ij}^{\min} + \Delta c_{ij2}, \dots, \sum_{j=1}^J \max_{kv} c_{ijk}, \quad k = \overline{2, K}. \quad (3)$$

Здесь $\Delta \tilde{K}_{r_{ij}}(\xi_{ijk})$ – максимальное значение коэффициента готовности при выполнении k работ j -й системы i -го вида; x_{ij} – множество кортежей из v (k) элементов, которые имеют следующую структуру: все элементы первого кортежа равны 0, у второго кортежа первый элемент равен 1, а остальные 0, у третьего – второй элемент равен 1, а остальные 0, у $(k+1)$ ($(v+1)$)-й элемент равен 1, а остальные 0. Например, если $n = 3$, то $x_{ij} = \{ \langle 0, 0, 0 \rangle, \langle 1, 0, 0 \rangle, \langle 0, 1, 0 \rangle, \langle 0, 0, 1 \rangle \}$.

Для решения задачи определения функции отклика для j -го оборудования иметь: зависимости $\Delta K_{r_{ij}}(C_{ij})$, полученные в результате решения первой задачи.

Найти: для $\forall i = \overline{1, I}$ и $c_i = c_i^{\min}, c_i + \Delta c_{i1}, c_i^{\min} + \Delta c_{i2}, \dots, c_i^{\min}$,

$$\vec{c}_i^* = \arg \max_{c_{ij}} \sum_{i=1}^I \Delta K_{r_{ij}}(c_{ij}) \text{ при условии, что } \sum_{i=1}^I c_{ij} \leq c_i,$$

где c_i – возможное количество средств, выделяемых на достижения требуемого коэффициента готовности i -го вида систем РКК;

\vec{c}_i^* – вектор, элементы которого характеризуют оптимальный объем работ по достижению требуемого коэффициента готовности j -й системы РКК, $\vec{c}_i^* = [{}^*c_{i1}, {}^*c_{i2}, \dots, {}^*c_{ij}]^T$;

$$c_i^{\min} = \min_i \min_j {}^*c_{ij}; \quad c_i^{\max} = \sum_{j=1}^J \max_j {}^*c_{ij};$$

Δc_i – точность распределения средств на достижение требуемого коэффициента готовности i -го вида систем.

Функциональные уравнения Беллмана, необходимые для построения функции отклика для этапа функционирования РКК, имеют вид

$$\Delta \tilde{K}_{i1}(\xi_{i1}) = \Delta K_{i1}(\xi_{i1}), \quad \xi_{ij} = 0, \quad c_{i1}, \quad c_{i1} + \Delta c_{i1}, \dots, \sum_{j=1}^J c_{ij}, \quad (4)$$

$$\Delta \tilde{K}_{ij}(\xi_{ij}) = \max_{\vec{c}_{ij} \in \vec{C}_{ij}} (\Delta \tilde{K}_{ij}(\vec{c}_{ij}) + \Delta \tilde{K}_{i,j-1}(\xi_{ij} - \vec{c}_{ij})), \quad (5)$$

$$\xi_{ij} = 0, \quad c_{ij1}, \quad c_{ij1} + \Delta c_{i1}, \quad c_{ij1} + \Delta c_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij}, \quad j = \overline{2, J}, \quad (6)$$

где \tilde{c}_{ij} – подмножество элементов множества ξ_{ij} , которым соответствуют неповторяющиеся элементы множества $\Delta \tilde{K}_{r_{ij}}(\xi_{ij})$, $\tilde{c}_{ij} = \{0, \tilde{c}_{i1}, \tilde{c}_{i2}, \dots, \tilde{c}_{ir}, \dots, \tilde{c}_{ij}\}$;

r_{ij} – количество неповторяющихся элементов множества ξ_{ij} .

При этом если $\xi_{ij} \leq \tilde{c}_{rij}$, то $\left(\xi_{ij} - \sum_{j=1}^{J-1} \tilde{c}_{r_{ij}} \right) \leq \tilde{c}_{ij} \leq \xi_{ij}$, иначе – $\left(\xi_{ij} - \sum_{j=1}^{J-1} \tilde{c}_{r_j} \right) \leq \tilde{c}_{ij} \leq \tilde{c}_{r_{ij}}$,

$$\tilde{c}_{ij} = \arg \max_{\tilde{c}_{ij} \in \tilde{C}_{ij}} (K_{r_{ij}}(\tilde{c}_{ij}) + K_{r_{i-1}}(\xi_{ij} - \tilde{c}_{ij})).$$

Построение функции отклика для всех ТС РКК решается как для первого шага (4–6), только для индекса I .

На основе знания функций отклика можно решать не только задачи оптимального распределения единовременно выделяемых средств, но и задачи распределения средств по годам таким образом, чтобы суммарный эффект за N лет был бы максимальным.

Предложенная классификация элементов ТС, регламентных работ, отказов и неисправностей ТС обеспечивает целенаправленный отбор регламентных работ по их воздействию на техническое состояние ТС и процессы технической эксплуатации.

Список используемых источников

1. ГОСТ РВ 0101-001–2007. Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 35 с.
2. Смирнов Н.Н. Техническая эксплуатация летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1990. – 423 с.
3. Шаповалов Е.Н. Организация эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 363 с.

В.В. Козлов,
доктор тех. наук, профессор;
И.О. Кукушкин,
кандидат тех. наук, доцент;
А.В. Лагун,
кандидат тех. наук, доцент;
В.Л. Слатов

МЕТОД СТРУКТУРИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Представлены основные положения метода структуризации системы показателей свойств ракетно-космического комплекса, призванные выявить проблемные аспекты, сопровождающих жизненный цикл комплекса. Предложена система оценивания качества процессов функционирования комплекса, на основе фрактальной иерархической системы его частных показателей. Рассмотрены процедуры выявления свойств процессов функционирования комплексов, формирования их показателей, а также агрегирования частных показателей в итоговую оценку качества процесса функционирования комплекса. Результаты применения представленного подхода позволяют выполнять сравнение качества процессов функционирования различных комплексов и наметить пути повышения уровня такого качества.

Ключевые слова: ракетно-космический комплекс, свойство, показатель свойства, фрактальная иерархическая система оценивания, семантика, морфологический анализ, анализ размерностей, свертка показателей свойств.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ изменений в действующих нормативно-технических документах по оцениванию процессов функционирования (ПФ) ракетно-космических комплексов (РКК) указывает на постоянный рост количества свойств, по которым такое оценивание следует выполнять. Причем в таких перечнях декларируются некоторые свойства, для которых не всегда приводятся методики расчета значений их показателей. В этой связи при оценивании ПФ РКК как сложных технических систем возникает ряд вопросов, таких как:

- сколько свойств необходимо для оценивания ПФ РКК;
- существует ли строго формализованная иерархическая система для таких свойств;
- каким образом осуществить переход от свойств к функциям их показателей и числовым значениям этих показателей;
- как агрегировать множество значений частных показателей в общую оценку ПФ РКК.

ОЦЕНИВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Основываясь на положениях работ [1] для оценивания качества функционирования целенаправленных процессов, реализуемых в РКК, следует использовать свойство эффективности операции подготовки и пуска ракет космического назначения (РКН) и его показатель как количественную меру этого свойства. Согласно [1] качество результатов функционирования РКК оценивается показателем $Y_{<n>}$, включающим в себя три группы компонент, $\langle A_{<n_1>}, R_{<n_2>}, T_{<n_3>} \rangle$ характеризующие целевые эффекты, затраты ресурсов и затраты времени, т. е. как минимум три компоненты. Перечисленные три группы компонент представляют собой технические аспекты ПФ РКК. В работе [2] предложено ввести в группу компонент показателя эффективности гуманитарный компонент, характеризующий уровень умений, знаний (интеллекта), интуиции персонала, участвующего в целенаправленном процессе подготовки и пуска РКН. Расширительное толкование показателя $Y_{<n>}$ в виде четырех компонент

$\langle A_{\langle n_1 \rangle}, R_{\langle n_2 \rangle}, T_{\langle n_3 \rangle}, I_{\langle n_4 \rangle} \rangle$ направлено на более детальное оценивание целенаправленных процессов, реализуемых как техническими средствами, так и персоналом РКК, для достижения цели операции комплекса – выведения космических аппаратов заданной номенклатуры на заданные орбиты.

В статье предложено использовать показатель качества ПФ РКК как средство для решения следующих взаимосвязанных задач. Во-первых, оценивание состоявшейся операции подготовки и пуска РКН с тем, чтобы определить, насколько полно эта операция выполнена. Во-вторых, поскольку каждый показатель должен что-то показывать, то для рассматриваемой операции этот показатель призван указать на причину недостаточного качества ПФ комплекса. Поскольку качество результатов функционирования РКК оценивается векторным показателем $Y_{\langle n \rangle}$, то возникают известные проблемы при его агрегировании в итоговую оценку.

Для решения этих проблем в статье предложено использовать результаты исследований в области дифференцируемого многообразия векторных пространств, в частности уже доказанной Г.Я. Перельманом гипотезы А. Пуанкаре, которая формулируется так: Пусть M – замкнутое многообразие размерности R^3 . Пусть в нем любая петля может быть стянута к точке, тогда M гомеоморфно трехмерной сфере. Иными словами, пространство R^3 может быть свернуто к сфере произвольно малого радиуса. Доказательства для случаев R^n получены ранее. Так, для $n > 4$ доказательство сделал С. Смейл, а для $n = 4$ доказательство получил А.А. Фридман. Таким образом, в хаусдорфовом пространстве X (т.е. топологическом пространстве, в котором каждые две различные точки отделены непересекающимися окрестностями) каждой точке соответствует набор n действительных чисел (x^1, \dots, x^n) , называемых координатами x в карте (U, φ) , где U окрестность точки $x \in X$, гомеоморфной открытому множеству R^n , а φ – гомеоморфизм или локальная карта X в точке x . Иными словами, n -мерное векторное пространство, оценивающее результаты ПФ РКК, может быть свернуто к численно значимой точке. Семейство карт $\{U_\alpha, \varphi_\alpha\}, \alpha \in A$, называется n -мерным C^k -атласом $(0 \leq k \leq \infty, a)$ многообразия X . Совокупности C^k -атласов называются дифференциальными структурами, которые можно ввести для произвольного множества X . При этом, на любом многообразии есть естественная действительная C^a -структура, причем эта структура единственна для мерности пространства $n=1, 2, 3, 5, 6, 12$. Поскольку компоненты вектора $Y_{\langle n \rangle}$ (в нашем случае $\langle A_{\langle n_1 \rangle}, R_{\langle n_2 \rangle}, T_{\langle n_3 \rangle}, I_{\langle n_4 \rangle} \rangle$) также являются векторами, то и для их оценивания применимы приведенные выше свертки векторных пространств. Однако при выбранной нами размерности $n = 4$ структура неединственная [3].

Для формирования единственной дифференциальной структуры векторного пространства R^4 , в статье использованы положения теории фракталов [4]. В решаемой задаче нас интересует как система оценивания результатов, так и оценки для ПФ РКК. Для формирования такой системы оценивания важным является вопрос об исследовании стационарного устойчивого состояния параметров ПФ РКК, которое может быть представлено системой оценивания в компактном топологическом пространстве. В результате использования процедур отображения многомерного пространства вектора качества ПФ комплекса в иное пространство можно получить устойчивую структуру пространств состояния для параметров РКК. Для этого предложено вводить фрактальные структуры, связывающие показатели свойств ПФ комплекса. Фрактал интересен и тем, что для исходного вектора показателя качества ПФ удастся снизить размерность его векторного поля, что, в свою очередь, открывает путь для решения проблемы анализа результата по векторному критерию. Таким образом, появляется возможность свернуть пространство компонентов вектора качества ПФ РКК в виде $\langle A, R, T, I \rangle$ к неподвижной точке (фрактальному аттрактору), а затем развернуть ее во фрактальную иерархическую структуру для компонентов показателя качества функционирования комплекса. Если для четырех компонент, которыми описываются четыре состав-

ляющих вектора качества ПФ РКК $\langle A, R, T, I \rangle$ задать систему итерированных функций аффинными преобразованиями в виде:

$$T_i(x) = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \end{bmatrix}, i=1,2,\dots,4. \quad (1)$$

Здесь T_i – сжимающие отображения на R^4 , значения коэффициентов матрицы (a, b, c, d) определяют масштабы сжатия и поворота, а коэффициенты (e, f) – смещение, то алгоритмы формирования фрактала дают образ фрактальной структуры системы оценивания качества ПФ комплекса. Различные значения коэффициентов в (1) приводят к разным фрактальным структурам. Предположив, что компоненты показателя качества ПФ РКК, находящиеся на верхнем уровне иерархии системы оценивания, равнозначны по своему влиянию на показатель качества, можно утверждать, что они равноудалены от аттрактора – показателя качества ПФ комплекса. Тогда в качестве базовой фрактальной фигуры следует принять равносторонний шестиугольник. Создание фрактальной (самоподобной) структуры выполняется при разбиении исходного множества на n подмножеств с коэффициентом масштабирования $r=2$. На основании этого фрактальная размерность (размерность подобия) оценивается соотношением

$$d = \frac{\log(n)}{\log(r)} = \frac{\log(6)}{\log(2)} = 2,585,$$

здесь основание логарифмов можно выбирать любым.

Несмотря на то, что достаточно сложно представить и изобразить на листе бумаги образ равностороннего шестиугольника в пространстве R^n , где $n=d$, нам представляется удобным использовать равносторонний шестиугольник как некую вспомогательную виртуальную геометрическую область, где в центре (в аттракторе фрактала) находится образ показателя качества ПФ процессов РКК. Тогда в вершинах этого фрактала находятся комбинации компонент ранее полученного вектора $\langle A, R, T, I \rangle$. Для определения количества таких компонент используется размещение, определяемое по известному соотношению

$$A_r^k = A(a_r^k) = \frac{k!}{(k-r)!},$$

где A_r^k число различных размещений, размещение a_r^k из k элементов по r .

Таким образом, число компонентов показателя качества ПФ РКК соответствует: комбинации первоначальных компонент по «три» вершины $A_r^k = 24$; комбинации первоначальных компонент по «две» вершины исходного вектора $A_r^k = 144$; комбинации первоначальных компонент по «одной» вершине $A_r^k = 288$ или количество свойств показателя качества ПФ РКК должно состоять из $24+144+288 = 456$ свойств, размещенных в шестиугольной фрактальной (самоподобной) иерархической структуре.

Самоподобие фрактальной иерархической структуры свойств показателя качества ПФ РКК, построенное на вложенных шестиугольниках, предполагает размещение в верхних уровнях иерархии четырех вложенных шестиугольников, в вершинах которых размещаются комбинации троек исходного вектора $\langle A, R, T, I \rangle$. Иными словами, векторов типа $\langle A, R, T \rangle, \langle A, R, I \rangle, \langle A, I, T \rangle$ и т. д.

На последующем уровне иерархии, также построенном на (фрактальных) шестиугольниках расположены «двойки» векторов типа $\langle A, R \rangle, \langle R, I \rangle, \langle A, T \rangle$ и т. д. На более низких уров-

нях иерархической системы оценивания свойств показателя качества ПФ РКК, также в вершинах (фрактальных) шестиугольников расположены единичные вектор $\langle A \rangle$, $\langle R \rangle$, $\langle T \rangle$ и т. д. Самоподобное или «размножение» шестигранников фрактальной структуры оценивания свойств ПФ РКК в принципе может быть продолжено до очень глубокой детализации того или иного свойства. Таким образом, и единичные вектора формируют свои шестерки во фрактальной структуре, а в вершинах таких шестиугольников можно построить свои шестиугольники с детализированными аспектами того или иного свойства, например, $\langle R_1 \rangle$, $\langle R_2 \rangle$, ..., $\langle R_6 \rangle$ и т. д. Такого рода структура составляет основу предложенного здесь метода структуризации системы показателей свойств РКК.

Далее, для придания понятийного содержания выявленным комбинациям векторов предлагается использовать семантику как раздел семиотики, изучающий знаковые системы в виде средства выражения смысла. При всей разнообразности словесных систем, используемых для научно-технических нужд, их применение, изучение и использование происходит на базе естественных языков, отличающихся существенной нестабильностью своего синтаксиса и особенно семантики, а также очень богатой прагматикой. Попытки приблизиться к разрешению сложности человеческого общения в этом направлении, выполненные в работах [5, 6], где показан подход к измерению ценности информации через семантические свойства. На «рациональном», логическом уровне восприятия и переработки информации, человек в определенной мере понимает и осознает ее смысл. Естественными уровнями понимания можно считать [5, 6], во-первых, понимание того, что уже известно, во-вторых, понимание новых понятий, и, в-третьих, понимание, предполагающее формирование новых умственных «стратегий».

В соответствии с работой [7] под качеством целенаправленной операции понимается степень соответствия реального результата операции желаемому результату. При этом считается [1], что любая операция представляет собой обмен, в результате которого сторона, проводящая операцию, за приобретенную для себя пользу, т. е. за полученный полезный эффект (целевой результат), расплачивается некоторым количеством затраченных ресурсов (материальных, энергетических и т. д.) и затратами времени на проведение операции. С этой точки зрения качество операции это не просто способность давать целевой результат, но и действенность операции, т. е. результативность функционирующей системы, соотнесенная с затратами всех видов ресурсов и времени. В работе [7] рекомендуется считать, что наибольшей степенью общности обладают такие свойства сложных технических систем (в нашем случае РКК) как устойчивость, помехоустойчивость, управляемость, способность и самоорганизанность процессов функционирования таких систем. В нашей статье под устойчивостью ПФ РКК понимается первичное свойство, без которого комплекс не может существовать. Для относительно простых систем это свойство объединяет такие свойства как прочность, стойкость к воздействию внешних факторов, сбалансированность и т. д. Кроме того, для РКК характерны различные формы структурной устойчивости, такие как надежность, живучесть и т. д. Там же [7] под помехоустойчивостью понимается способность противодействовать помехам (в основном информационным). Нам представляется, что это свойство следует расширить путем обобщения вредоносных воздействий на РКК, которым он подвергается на протяжении всего жизненного цикла. Такие воздействия могут быть как внутренними, так и внешними, что позволяет назвать это свойство безопасностью ПФ РКК.

Под управляемостью обычно понимают способность системы переходить за конечное время из одного состояния в другое под влиянием управляющего воздействия.

Управляемость объединяет такие свойства системы, как гибкость управления, его оперативность, точность, быстродействие, инерционность и т. д. Проблемность формализации этого свойства в том, что согласно [8] в классической теории (например, в теории управляемости систем, описываемых дифференциальными уравнениями в пространстве состояний) функции для показателя управляемости в явном виде не фигурируют. Под способностью понимается свойство возможности комплекса достигать минимально необходимые результаты в ПФ. Это свойство объединяет совокупность свойств системы, определяющих ее функциональное предназначение. Для составляющих элементов комплекса оно характеризует их производительность, мощность, обеспеченности ресурсами и т. п. Свойство способности реализации ПФ РКК свидетельствует о том, что комплекс может достичь намеченные цели, но насколько рационально организован ПФ показатель способности – не показывает. Поэтому значение показателя способности можно расценивать как минимально необходимый уровень качества ПФ, с которым можно достигать цели операции РКК. В дополнении к показателю свойства способности как к минимальному уровню качества ПФ комплекса следует ввести показатель свойства действенности как свойства, призванного показать максимально возможное значение показателя качества ПФ комплекса (потенциально достижимого качества функционирования комплекса), тогда численное значение показателя действенности представляется идеальной точной исхода операции.

Использование этого показателя в системе оценивания качества ПФ РКК позволяет решить одну из важнейших проблем оценивания – сравнение требуемой и реальной результата целенаправленной операции, выполняемой РКК.

Наиболее сложным, высшим свойством РКК, в соответствии с [7], следует считать самоорганизацию. Термин «самоорганизация» широко используется в научной литературе и трактуется неоднозначно как в технических, так и в иных областях знаний [9]. Свойство самоорганизации ПФ РКК следует рассматривать как эволюцию технологических процессов в виде привыкания, обучения и самообучения, организации и адаптации. При этом возможны процессы взаимной опережающей адаптации компонентов комплекса между собой и его систем взаимодействующих с внешней средой. Адаптация, согласно [10] (лат. *adaptatio* – приспособление) – это приспособление системы к реальным условиям. Поэтому свойству адаптации РКК придается смысл того, что такое свойство может быть достигнуто путем придания РКК возможности его приспособления к новым научно-техническим, экономическим и военно-политическим ситуациям, заранее не обозначенным в техническом задании на комплекс. Тогда в процессе жизненного цикла комплекс, обладающий этим свойством, сможет изменять свои характеристики. Для идентификации рекомендуемых в [7] шести наиболее общих свойств (устойчивости, безопасности, управляемости, способности, результативности и адаптивности) следует выполнить семантический анализ этих свойств.

Анализируя свойство устойчивости с позиций семантического анализа, можно отметить, что теория устойчивости – это совокупность взглядов, представлений, идей, понятий, рассуждений, методов, возникших и возникающих с целью изучения устойчивости движения, понимаемого в самом общем виде. Таким образом, теория устойчивости является теорией в широком смысле этого слова.

Среди различных понятий свойства устойчивости наиболее известные подходы изложены А.М. Ляпуновым, Ж. Лагранжем, С. Пуассоном, Л.С. Понтрягиным, У. Гамильтоном и др. Семантический анализ свойства устойчивости процессов функционирования РКК, выполненный на основе словарей, ГОСТов, материалов научной и технической литературы, позволяет обобщить физические и математические аспекты устойчивости ПФ комплекса, на основании чего можно констатировать, что это свойство содержит целевые аспекты РКК (A), их ресурсное обеспечение (R) и информационные аспекты о структуре и поведении РКК (I). Интегрируя выявленные сведения о свойстве устойчивости можно сказать, что устойчивость ПФ для РКК – это свойство, характеризующее близость причин и следствий в ПФ РКК. Результаты такого семантического анализа показывают, что свойству устойчивости технологических ПФ РКК соответствует вектор $\langle A, R, I \rangle$.

Аналогичные рассуждения, выполненные на основании семантического анализа, приводят нас к следующим выводам:

1. Управляемость, как свойство целенаправленного технологического ПФ РКК – это свойство, которое гарантирует возможность достижения любой заданной точки в пространстве состояний РКК при ожидаемых внешних воздействиях. Поскольку управляющее воздействие для РКК подразумевает наличие как управляющего персонала, так и программ управления, то в полной мере можно принять описание свойства управляемости на основе вектора, построенного на следующей тройке векторов $\langle A, T, I \rangle$, где компонент A описывает цель управления, компонент T – временные параметры управления, а I – знания и интеллект управляющего персонала, а также наличие программы управления.

2. Безопасность процесса функционирования РКК – это свойство ПФ комплекса, характеризующее ненанесение ущерба как РКК, так и окружающей среде, превышающего допустимые величины ущерба. Из семантической гирлянды свойства безопасности выявляются информационный, временной и ресурсный аспекты этого свойства, т. е. это свойство может быть описано тройкой векторов $\langle A, I, R \rangle$.

3. Семантический анализ показывает, что свойство действенности ПФ технической системы описывает один из аспектов свойства эффективности, поскольку в переводе с латинского *effictivus* означает действенный, созидательный. В [11] отмечается, что действенный – это прилагательное, означающее сильное воздействие на кого-либо или что-либо, дающий наилучший результат, эффект. Поэтому здесь действенность – комплексная характеристика потенциальных и (или) реальных результатов использования комплекса с учетом степени соответствия этих результатов главным целям, показателей ресурсопотребления, а также других видов количественных и качественных показателей (временных), выявленных методами системного анализа. Исходя из этого, свойство действенности должно описываться тройкой векторов $\langle A, R, T \rangle$.

4. Поскольку все ПФ РКК построены на физических процессах, к ним применим принцип Гамильтона. Согласно этому принципу изменение пространств состояния параметров, описывающих ПФ РКК, может быть охарактеризовано функцией Лагранжа. Изменение положения РКК в многомерном пространстве состояний его параметров характеризуется интегралом функции Лагранжа во времени и называется действием. Согласно принципу наименьшего действия, такой интеграл в реальной природе имеет наименьшее возможное значение. На основании этих рассуждений можно принять, что способность – свойство ПФ РКК, характеризующее возможность достижения целей операции по подготовке и пуску РКН

с минимально необходимым результатом. Иными словами, свойство способности для ПФ РКК и выступает как некий критерий пригодности комплекса с минимально допустимым результатом в достижении назначенной цели.

Используемая ранее процедура размещения исходного вектора формально различает вектора $\langle A, T, R \rangle$ и $\langle A, R, T \rangle$, которые вместе с тем, на основании результатов семантического анализа свойства действенности и способности представляются различными. На основании этого свойство способности ПФ РКК здесь предложено описывать вектором $\langle A, T, R \rangle$.

Адаптивность РКК как некий аналог кибернетического понятия самоорганизованности, является наиболее сложным свойством, которым обладают системы большой сложности. Адаптация – свойство сложной технической системы, в нашем случае РКК, обеспечивающее ему способность многократно сохранять свои характеристики и выполнять функции в условиях внутренней деградации и изменчивости внешней обстановки (приспособление комплекса к реальным условиям эксплуатации). Тогда адаптивность – фрагмент качества ПФ комплекса, который описывает поведение РКК при участии человеческого интеллекта, но, в то же время, имеется введенный заранее искусственный интеллект (автономный автоматизированный программно-аппаратный комплекс). В этой связи свойство адаптивности для ПФ РКК в большей степени адекватно описывается тройкой векторов $\langle A, I, T \rangle$.

Используя аналогичный подход, удастся на лингвистическом уровне идентифицировать все комбинации исходного вектора $\langle A, R, T, I \rangle$.

Следующим шагом в создании фрактальной иерархической системы оценивания ПФ РКК является переход от лингвистического описания выявленных свойств РКК к математическим выражениями для расчета численных значений показателей. На этом шаге был использован морфологический анализ [12]. Целью такого анализа является выявление физических параметров входящих в математическое выражение для показателя того или иного свойства ПФ. Для этого строится морфологическая гирлянда слов и понятий исследуемого свойства. На основании такой гирлянды формируется частично упорядоченная последовательность отношений понятий, которым описывается то или иное свойство. Далее выделяется центральная и периферийная лингвистическая информация, описывающая ПФ, которые позволяют выделить определяющие параметры для показателя рассматриваемого свойства. Из перечня определяющих параметров показателя свойства формируется алгебраическое выражение, позволяющее оценить его численно. С этой целью использована π -теорема анализа размерности [13]. Согласно этой теореме, если для определяющих параметров имеется n физических размерностей, и из них k размерностей обладают независимой размерностью, то для получения выражения показателя соответствующего свойства можно записать функциональную зависимость показателя от определяющих параметров. Однако, π -теорема позволяет записать такую функциональную зависимость с точностью до неопределенной константы. При этом аргументами функции показателя являются безразмерные комплексы, количество которых равно разности n минус k .

Покажем процедуру формирования функциональной зависимости показателя от определяющих его параметров на примере показателя сохраняемости объектов РКК. Здесь под сохраняемостью, согласно ГОСТ 27.002–89, будем понимать свойство РКК сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В ПФ РКК значение показателя свойства сохраняемости снижаются, как по объективным причинам (старение, износ, коррозия, деформация), так и по субъективным причинам (аварии, ошибки) т. е. в результате воздействия опасных факторов. Рассмотрение задачи формирования показателя свойства сохраняемости для РКК удобнее начинать формирования антитезы этого свойства – свойства повреждаемости. Процедура морфологического анализа выявила в качестве центральной информации перечень опасных факторов, в условиях которых должен функционировать РКК.

Для описания таких факторов используются следующие параметры: неконтролируемая высвобождаемая энергия – E (тепловая, механическая, взрывных волн, электромагнитная и т. д.); неконтролируемое высвобождение опасных веществ – m (радиационных и химически); неконтролируемое распространение или нарушение потоков информации – I (управляющей, оповещающей, предупреждающей); вероятность возникновения аварии и катастрофы – P ; время действия опасных факторов – t_b .

Таким образом, мы имеем функциональную зависимость для показателя повреждаемости $Y_{\text{повреждать}}$, которая является функцией определяющих параметров, строго полученной на основании имеющегося тезауруса $Y_{\text{повреждать}} = f(E, m, I, P, t_b)$. Для полученного набора определяющих параметров единиц измерения пять: $E = (\text{дж})$; $m = (\text{кг})$; $I = (-)$; $P = (-)$; $t_b = (\text{с})$, т. е. $n=5$.

Тогда как независимыми единицами являются кг; с; м, т. е. $k=3$. Следовательно, для показателя повреждаемости функциональная зависимость имеет вид $Y_{\text{повреждать}} = \text{const}(\pi_1, \pi_2)$, где π_1, π_2 – два безразмерных комплекса сформированных из размерностей определяющих параметров. Однако из имеющегося набора размерностей невозможно сформировать два искоемых безразмерных комплексов. Такая недостаточность исходной информации показывает на неполноту перечня факторов опасности. Анализ размерностей показывает на необходимость введения дополнительных опасных факторов (и их размерностей).

Перечень дополнительных факторов опасности следует искать на основании недостающих физических размерностей тех или иных факторов. Для рассматриваемой задачи недостающими размерностями являются (м^2) и (дж).

На основании этого дополнительными факторами можно назначить: площадь поражения опасными факторами – $F = (\text{м}^2)$; способность элементов комплекса к защите от воздействия опасных факторов, т. е. параметр, характеризующий возможность диссипации потоков энергии и вещества при воздействии опасных факторов – $E_s = (\text{дж})$.

Дополнительные параметры не меняют полученные ранее выводы π – теоремы, а следовательно, безразмерная функция повреждаемости может быть записана в виде:

$$Y_{\text{повреждать}} = \text{const} \cdot P \cdot I \cdot \frac{NGF}{E_s^2},$$

с учетом того, что $\pi_1 = P \cdot I$; $\pi_2 = NGF/E_s^2$; $N = E/t_b$ – мощность потоков опасных факторов $G = m/t_b$ – расход опасных веществ.

Для устранения неопределенной константы в выражении для показателя повреждаемости следует ввести масштабирование показателя повреждаемости со шкалой $0 \div 1$. При задании нормированных значений для определяющих параметров в виде

$$\bar{P} = \frac{P^{\text{реал}}}{[P^{\text{мп}}]}; \bar{I} = \frac{I^{\text{реал}}}{[I^{\text{мп}}]}; \bar{N} = \frac{N^{\text{реал}}}{[N^{\text{мп}}]}; \bar{G} = \frac{G^{\text{реал}}}{[G^{\text{мп}}]}; \bar{F} = \frac{F^{\text{реал}}}{[F^{\text{мп}}]}; \bar{E}_s = \frac{E_s^{\text{реал}}}{[E_s^{\text{мп}}]},$$

где в знаменателях дробей требуемые (заданные) значения соответствующих параметров, можно записать выражение для функции показателя повреждаемости в виде

$$\bar{Y}_{\text{повреждать}} = \bar{PI} \frac{\bar{NGF}}{\bar{E}_s^2}.$$

Используя очевидное соотношение между масштабированными безразмерными функциями показателей сохраняемости и повреждаемости $\bar{Y}_{\text{сохранять}} + \bar{Y}_{\text{повреждать}} = 1$, окончательно можно получить выражение для показателя сохраняемости в виде:

$$\bar{Y}_{\text{сохранять}} = 1 - \bar{PI} \frac{\bar{NGF}}{\bar{E}_s^2}$$

Аналогичные процедуры можно применить для других показателей ПФ РКК.

В результате при наличии полного перечня показателей частных свойств ПФ РКК и фрактальной иерархической системы оценивания, представляется возможным получить обобщенный показатель ПФ комплекса.

Для этого возможно использовать информационную свертку значений частных показателей, двигаясь от низлежащего уровня иерархии к ее верхнему уровню.

Алгоритм такой свертки представлен в [14]. Программная реализация такого агрегирования выполнена в среде NetBeans.

Результаты расчета показаны на рис. 1. Расчет выполнен для варианта численных значений масштабированных показателей свойств описывающих ПФ РКК верхнего уровня фрактальной иерархической системы оценивания.

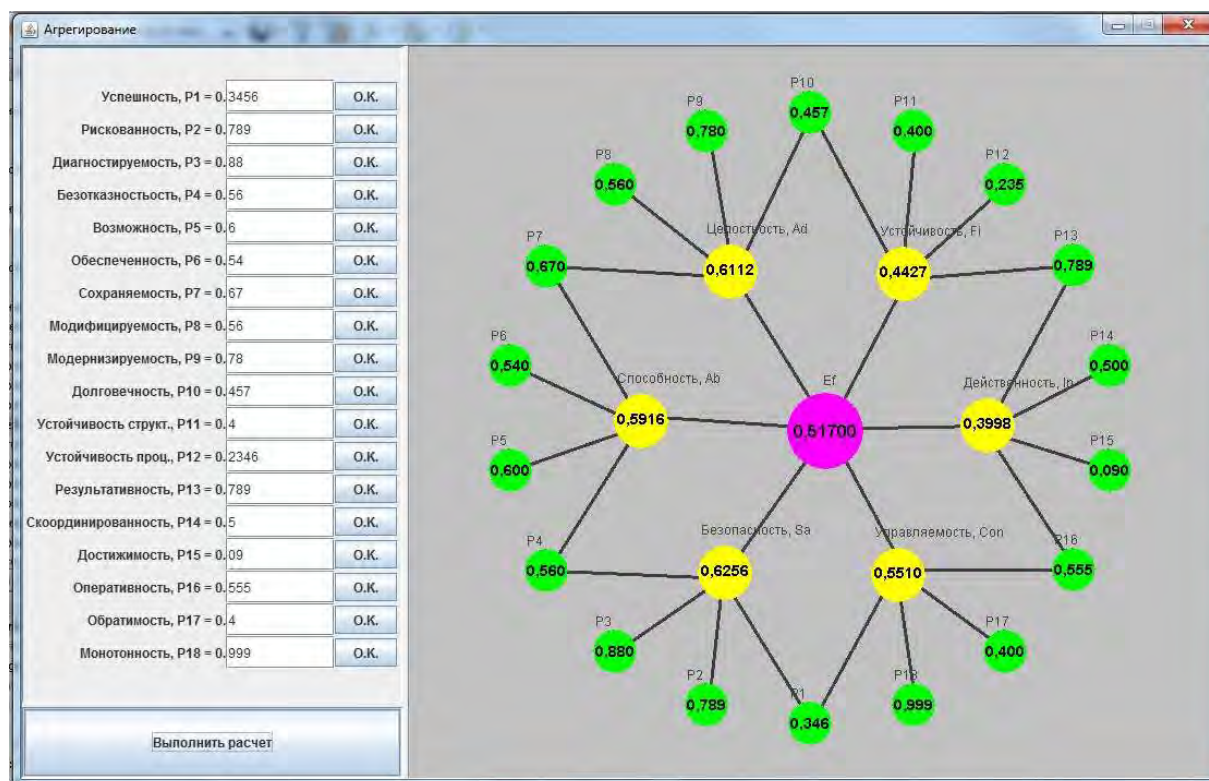


Рис. 1. Результат расчета ПФ комплекса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный здесь метод структуризации системы показателей свойств ПФ РКК призван оценивать качество ПФ комплекса на этапе эксплуатации, выполнять сравнение качества ПФ различных РКК и выявлять причины несоответствия заданного и реального достигнутого уровня качества. Кроме того, численные значения частных показателей качества ПФ комплекса, могут указать на пути устранения, выявленных при его оценивании, причин низкого значения обобщенного показателя качества ПФ РКК.

Список используемых источников

1. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
2. Козлов В.В., Аверкиев Н.Ф., Мокан Д.О. Иерархическая структура показателей сложной технической системы в интересах обеспечения национальной безопасности // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы Междунар. научно-исслед. конф. – СПб., 2012. – Т. 5.: Стратегия будущего. – С. 251–254.
3. Математическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 552 с.
4. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
5. Harrah D. Communication: Alogical Model. – Cambridge (Mass), 1967. – 22 p.
6. Шрейдер Ю.Ф. Об одной модели семантической теории информации // Проблемы кибернетики. – 1965. – Вып. 13. – С. 233–240.
7. Надежность и эффективность в технике: справочник / ред. совет.: В.С. Авдудевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 328 с.
8. Месарович М., Мако Д., Такахара И.М. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
9. Ципкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1975. – 400 с.
10. Краткий экономико-математический словарь. – М.: Наука, 1979. – 360 с.
11. Ефремова Т.Ф. Толково-словообразовательный словарь русского языка. – М.: Наука, 2000 – 488 с.
12. Назаров А.А. Морфологическое прогнозирование развития военной техники. – МО СССР, 1986. – 248 с.
13. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
14. Агрегирование свойств сложных технических систем на основе информационной свертки / В.В. Козлов, В.А. Лагун, Е.А. Миронов, А.В. Антропова // Информация и Космос / под общ. ред. С.П. Присяжнюка. – СПб.: Art-Xpress, 2018. – Т. 3. – С. 44–48.

В.И. Крыжановский,
кандидат техн. наук, доцент;
В.И. Щербаков,
кандидат техн. наук, доцент

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХКОНТУРНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ НА ЦЕЛЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

Разработана динамическая математическая модель двухконтурной следящей системы для разворота поворотной платформы, на которой расположен оптико-электронный прибор (ОЭП). Наведение оптической оси ОЭП на цель производится путем одновременного разворота платформы по азимуту и разворота ОЭП относительно платформы по высоте. Путем численного моделирования исследовано влияние перекрестных связей между контурами на качество переходных процессов.

Ключевые слова: Математическая модель движения, перекрестная связь, двухконтурная следящая система, переходный процесс, наведение на цель.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является двухконтурная следящая система для управления угловым движением платформы, на которой расположен ОЭП. Каждый из элементов системы имеет одну степень свободы, при этом платформа вместе с ОЭП совершает угловое движение относительно неподвижной оси вращения, а ОЭП – относительно оси, которая вращается вместе с платформой. Традиционно наведение ОЭП на цель производится путем последовательного наведения по азимуту, а затем – по высоте, что приводит к увеличению длительности процесса. При одновременном развороте по азимуту и высоте возникают перекрестные связи, влияние которых на качество переходных процессов, в том числе на запас устойчивости и быстродействие изучены недостаточно. Поэтому разработка корректной математической модели и исследование влияния перекрестных связей на процесс управления является актуальной и практически важной задачей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ С ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРОМ

В классической механике обоснован и широко используется в научной практике вывод дифференциальных уравнений углового движения механической системы на основе теоремы об изменении кинетического момента системы в подвижной системе координат. Существенным ограничением этого подхода является требование к подвижной системе координат, определяемое условиями Кёнига [1]. При этих условиях оси подвижной системы координат должны оставаться параллельными соответствующим осям неподвижной системы координат. Рассматриваемый объект исследования не допускает задание его движения кинематическими параметрами в осях Кёнига. По этой причине возникает задача разработки математической модели движения в системе координат, связанной с платформой, на которой установлен ОЭП.

Положение платформы связано с подвижной системой координат $Ox_1y_1z_1$ (рис. 1), которая вращается относительно оси OZ неподвижной системы координат $OXYZ$ с угловой скоростью $\dot{\psi}$, а положение одноименных абсцисс и ординат определяется углом азимута ψ . Оси аппликат OZ и Oz_1 сонаправлены.

Положение ОЭП определяет связанная с ним подвижная система координат $Ox_1y_1z_1$. Ось Oy_1 направлена по оптической оси ОЭП и вращается относительно подвижных осей абсцисс,

связанных с платформой и ОЭП с угловой скоростью $\dot{\theta}$. Текущее положение оптической оси над горизонтом определяется углом высоты θ .

Инерционно-массовыми параметрами системы являются I_{x1}, I_{y1}, I_{z1} – моменты инерции ОЭП относительно осей подвижной системы координат $Ox_1y_1z_1$, $I_{z,пл}$ – момент инерции платформы относительно оси вращения Oz .

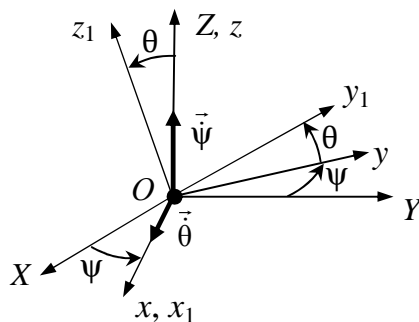


Рис. 1. Кинематические параметры положения следящей системы

Управление угловым движением системы производится моментами сил M_x^e и M_z^e относительно осей вращения платформы и ОЭП.

Для составления дифференциальных уравнений движения платформы с ОЭП воспользуемся теоремой об изменении кинетического момента системы в подвижной системе координат $Oxyz$ [2]:

$$\frac{d\vec{K}_0}{dt} = \vec{M}_0^e + \vec{M}_0(\vec{J}_B) + \vec{M}_0(\vec{J}_{пл}), \quad (1)$$

где $\vec{M}_0(\vec{J}_B)$, $\vec{M}_0(\vec{J}_{пл})$ – векторы моментов переносных сил инерции относительно начала системы координат, приложенных к ОЭП и платформе и обусловленных вращением платформы;

\vec{K}_0 – кинетический момент платформы с ОЭП относительно начала системы координат;

\vec{M}_0^e – вектор момента управляющих сил относительно начала системы координат;

Спроектируем векторное выражение (1) на оси подвижной системы координат $Oxyz$:

$$\begin{aligned} \frac{dK_x}{dt} &= M_x^e + M_x(\vec{J}_B) + M_x(\vec{J}_{пл}); \\ \frac{dK_y}{dt} &= M_y(\vec{J}_B) + M_y(\vec{J}_{пл}); \\ \frac{dK_z}{dt} &= M_z^e + M_z(\vec{J}_B) + M_z(\vec{J}_{пл}). \end{aligned} \quad (2)$$

Если в системе уравнений (2) выразить проекции вектора кинетического момента и проекции моментов сил инерции через инерционно-массовые параметры и кинематические параметры движения платформы с ОЭП, то получим дифференциальные уравнения движения платформы с ОЭП.

Проекции вектора кинетического момента [2]:

$$\begin{aligned} K_x &= I_x \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{xz} \omega_z; \\ K_y &= -I_{yx} \omega_x + I_y \omega_y - I_{yz} \omega_z; \\ K_z &= -I_{zx} \omega_x - I_{zy} \omega_y + I_z \omega_z. \end{aligned} \quad (3)$$

В правых частях соотношений (3) первый сомножитель каждого слагаемого – элемент матрицы инерции платформы с ОЭП относительно осей системы координат $Oxyz$. Вторым сомножителем – это проекции вектора угловой скорости движения платформы с ОЭП на те же оси. Поскольку в системе координат $Oxyz$ платформа неподвижна, а угловое движение совершает только ОЭП (см. рис. 1) в координатной плоскости Oyz , то вектор угловой скорости направлен по оси Ox :

$$\omega_x = \dot{\theta}; \quad \omega_y = \omega_z = 0, \quad (4)$$

при этом координатная ось Ox является главной осью инерции ОЭП:

$$I_{xy} = I_{xz} = 0, \quad (5)$$

После подстановки (4) и (5) в (3), получим:

$$K_x = I_{x.B} \cdot \dot{\theta}; \quad K_y = K_z = 0. \quad (6)$$

Векторы моментов сил инерции:

$$\left. \begin{aligned} \vec{M}_0(\vec{J}_B) &= - \iiint_{W_B} (\vec{r} \cdot \vec{a}_B) dm; \\ \vec{M}_0(\vec{J}_{пл}) &= - \iiint_{W_{пл}} (\vec{r} \cdot \vec{a}_{пл}) dm, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где \vec{a}_B и $\vec{a}_{пл}$ – векторы переносных ускорений ОЭП и платформы;

W_B и $W_{пл}$ – объемы формы ОЭП и платформы.

Опуская промежуточные преобразования в (7), запишем конечный результат:

$$\vec{M}_0(\vec{J}_B) = -(I_{yz.B} \cdot \dot{\psi}^2) \vec{i} + (I_{yz.B} \cdot \dot{\psi}) \vec{j} - (I_{z.B} \cdot \ddot{\psi}) \vec{k}; \quad (8)$$

$$\vec{M}_0(\vec{J}_{пл}) = -(I_{z.пл} \cdot \ddot{\psi}) \vec{k}. \quad (9)$$

После подстановки выражений (6), (8) и (9) в (2) и приведения подобных получим систему дифференциальных уравнений углового движения платформы с ОЭП:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta} &= \frac{M_x^e - (I_{yz.B} \cdot \dot{\psi}^2)}{I_{x.B}}; \\ \ddot{\psi} &= \frac{M_z^e}{I_{z.B} + I_{z.пл}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В уравнениях (10) моменты инерции $I_{z.пл}$ и $I_{x.B} = I_{x1}$ постоянные величины, а моменты инерции ОЭП $I_{z.B}$ и $I_{yz.B}$ – это переменные величины, зависящие от параметров его положения.

Рассмотрим методику вычисления переменных моментов инерции ОЭП на примере модели формы ОЭП в виде однородного по массе цилиндра массой m_B , радиусом R и длиной L .

Осевые моменты инерции цилиндра в связанной с ним системе координат $Ox_1y_1z_1$ постоянны и равны:

$$I_{x1} = I_{z1} = m_B \left(\frac{L^2}{3} + \frac{R^2}{4} \right); \quad I_{y1} = m_B \frac{R^2}{2}. \quad (11)$$

Момент инерции $I_{z.B}$ определяется по формуле расчета относительно произвольной оси, положение которой задано направляющими косинусами [2]:

$$I_{z.B} = I_{y1} \cdot \sin^2 \theta + I_{z1} \cdot \cos^2 \theta = m_B \left[\frac{R^2}{2} + \left(\frac{L^2}{3} - \frac{R^2}{4} \right) \cdot \cos^2 \theta \right]. \quad (12)$$

Центробежный момент инерции ОЭП $I_{yz.B}$ вычислим по формуле, определяющей это понятие [2]:

$$I_{yz.B} = \iiint_{W_B} y \cdot z \cdot dm,$$

где dm – элементарная масса ОЭП (рис. 2):

$$dm = \rho \gamma dr d\varphi dl;$$

γ – плотность массы ОЭП;

l – расстояние от начала координат до элементарного диска, $l = OO_1$;

dl – толщина элементарного диска;

y и z – координаты элементарной массы в системе координат $Oxyz$:

$$y = l \cdot \cos \theta - \rho \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta; \quad z = l \cdot \sin \theta + \rho \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta. \quad (13)$$

После подстановки выражений (12) и (13) в (11) и интегрирования получим:

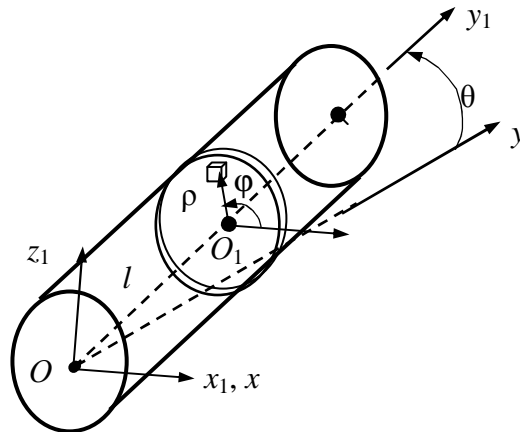


Рис. 2. Параметры положения элементарной массы ОЭП

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Структурная схема платформы с ОЭП как объекта управления двухконтурной следящей системы, соответствующая уравнениям (10), представлена на рис. 3.

На рисунке введены следующие обозначения:

$$k_\theta = \frac{1}{I_{x.B}}, \quad (14)$$

$$k_{\theta\psi}(\theta) = \frac{I_{yz.B}(\theta)}{I_{x.B}}, \quad (15)$$

$$k_\psi(\theta) = \frac{1}{I_{z.пл} + I_{z.B}(\theta)}. \quad (16)$$

Как видно из системы уравнений (10) и структурной схемы, изображенной на рис. 3, при одновременном развороте по азимуту и высоте возникают перекрестные связи. Влияние контура разворота по азимуту (в дальнейшем первый канал) на контур разворота по высоте (в дальнейшем второй канал) обусловлено моментом, возникающим вследствие центробежной

силы, стремящейся свести угол высоты к нулю. Влияние первого канала на второй канал обусловлено в общем случае изменением момента инерции всего поворотного механизма относительно оси z при изменении угла высоты.

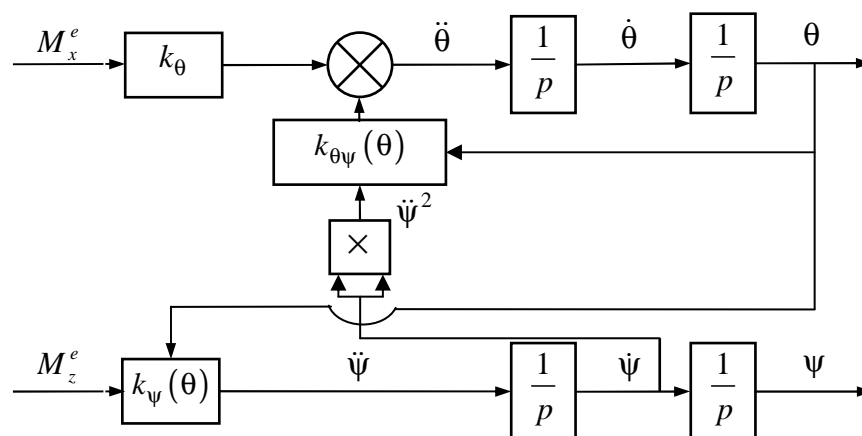


Рис. 3. Структурное представление системы уравнений

Анализ этих уравнений показывает, что при выполнении условия:

$$I_{z,пл} < I_{z1} \quad (17)$$

момент инерции относительно оси z практически не меняется при изменении угла высоты и влиянием этого угла на первый канал можно пренебречь. В этом случае структурная схема первого канала имеет вид, представленный на рис. 4.

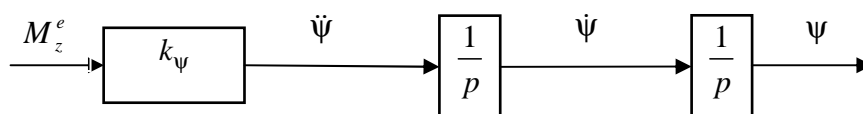


Рис. 4. Структура первого канала при отсутствии перекрестных связей

На рис. 4 введено обозначение

$$k_{\psi} = \frac{1}{I_{z,пл} + I_{z1}}. \quad (18)$$

Для создания управляющего момента с целью разворота платформы будем использовать традиционную электромеханическую дистанционную следящую систему [3], структурная схема которой имеет вид, изображенный на рис. 5.

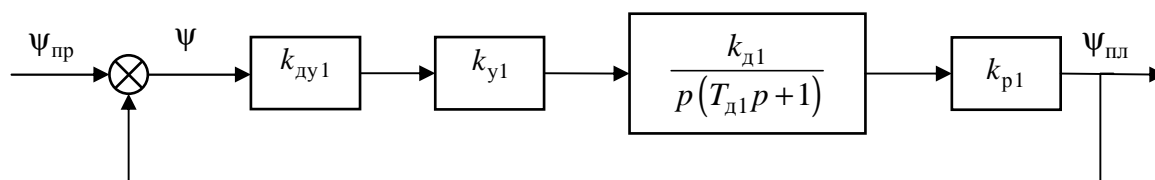


Рис. 5. Структурная схема электромеханической дистанционной следящей системы

На рис. 5 приведены следующие обозначения:

$\psi_{пр}$ – программное значение угла разворота платформы,

$\psi_{пл}$ – фактическое значение угла разворота платформы,

ψ – угол рассогласования,

$k_{ду1}$ – коэффициент передачи датчика угла,

k_{y1} – коэффициент передачи усилителя,

$k_{д1}$ – коэффициент передачи двигателя,

$T_{д1}$ – постоянная времени двигателя,

k_{p1} – коэффициент передачи редуктора.

Методика выбора двигателя и редуктора, расчета их параметров с учетом значения коэффициента k_{ψ} подробно изложена в литературе по теории автоматического управления.

Передаточная функция замкнутой системы, изображенной на рис. 4, имеет вид:

$$\Phi_1(p) = \frac{k_1}{T_{д1}p^2 + p + k_1}, \quad (19)$$

где $k_1 = k_{дy1} \cdot k_{y1} \cdot k_{д1} \cdot k_{p1}$.

При выполнении условия:

$$4k_1T_{д1} > 1 \quad (20)$$

передаточную функцию (19) можно представить в виде типового колебательного звена

$$\Phi_1(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}, \quad (21)$$

где

$$T_1 = \sqrt{\frac{T_{д1}}{k_1}}, \quad \xi_1 = \sqrt{\frac{1}{4k_1T_{д1}}}.$$

Если условие (20) не выполняется, то передаточную функцию (19) можно представить в виде аperiodического звена второго порядка. Такое звено характеризуется большой длительностью переходного процесса, поэтому в данной статье не рассматривается. Известно [3], что наименьшая длительность переходного процесса достигается, если он носит колебательный характер с небольшим перерегулированием (10-30) %. Осуществить выбор параметров системы для обеспечения вышеназванных условий можно одним из известных методов [4], однако сравнительная простота и изученность колебательного звена позволяет найти конечное соотношение для обеспечения заданного перерегулирования. Пример переходной характеристики для колебательного звена (21) приведен на рис. 7.

Величина перерегулирования определяется выражением:

$$\sigma = (h_{\max} - 1) \cdot 100 \%, \quad (22)$$

где

$$h_{\max} = 1 + \exp(-\alpha \cdot t_{\max}); \quad t_{\max} = \frac{\pi}{\omega_0}; \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{1-\xi_1^2}}{T_1}; \quad \alpha = \frac{\xi_1}{T_1}. \quad (23)$$

Путем несложных алгебраических преобразований с использованием формул (21)-(23) можно получить выражение для определения коэффициента передачи разомкнутой системы, при котором обеспечивается заданное перерегулирование:

$$k_1 = \frac{\pi^2 + \ln(0,01\sigma)^2}{4 \ln(0,01\sigma)^2 T_{д1}}. \quad (24)$$

Поскольку коэффициенты передачи датчика угла, двигателя и редуктора определяются в процессе выбора этих элементов на более ранних этапах проектирования, обеспечение заданного перерегулирования производится путем выбора требуемого коэффициента усиления усилителя. С учетом выражения (19) получаем:

$$k_{y1} = \frac{\pi^2 + \ln(0,01\sigma)^2}{4 \ln(0,01\sigma)^2 T_{д1} k_{дy1} \cdot k_{д1} \cdot k_{p1}}. \quad (25)$$

Все вышеизложенное может быть использовано для проектирования следящей системы второго канала, если влияние движения платформы на движение ОЭП незначительно. Условия этого зависят от массогабаритных характеристик ОЭП, его геометрической конфигурации, способа подвеса ОЭП к платформе, их получение выходит за рамки данной статьи.

Наибольший интерес представляет исследование динамики движения платформы и ОЭП для случая, когда перекрестные связи оказывают существенное влияние на основное движение.

Структурная схема двухкантурной следящей системы с учетом перекрестных связей представлена на рис. 6.

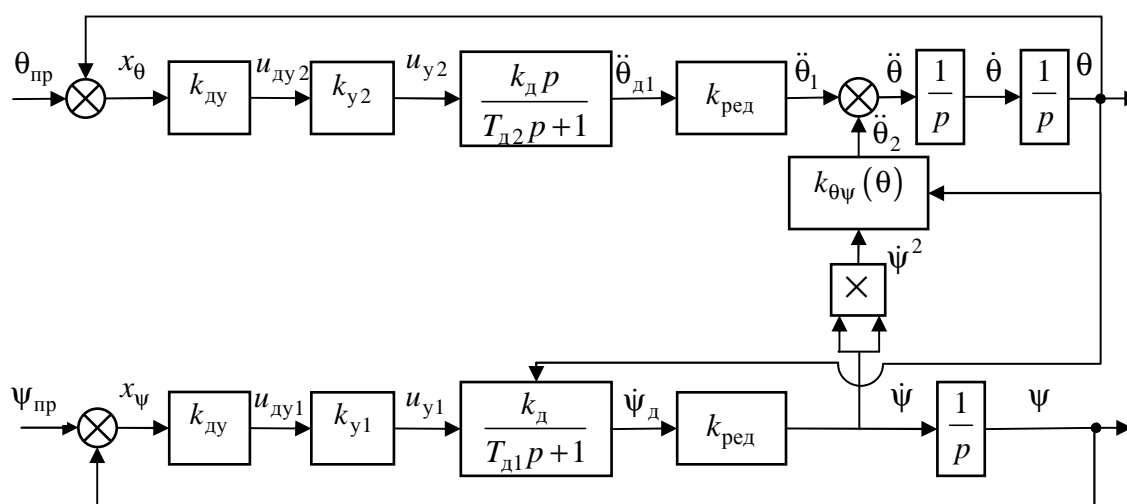


Рис. 6. Структурная схема двухкантурной следящей системы

Соответствующая структурной схеме математическая модель может быть записана в виде системы уравнений:

$$x_{\psi} = \psi_{пр} - \psi, \quad u_{ду1} = k_{ду} x_{\psi}, \quad u_{y1} = k_{y1} u_{ду1}, \quad I_{в} = m_{в} \left[\frac{R_{в}^2}{2} + \left(\frac{L_{в}^2}{3} - \frac{R_{в}^2}{4} \right) \cos^2 \theta \right],$$

$$I_{сум} = I_{пл} + I_{в}, \quad I_{прив} = I_{д} + I_{ред} + \frac{I_{сум} k_{ред}^2}{\eta_{ред}}, \quad T_{д1} = \frac{1,2 \cdot I_{прив} \cdot R_{д}}{c_m c_e},$$

$$\dot{\psi}_д = \dot{\psi}_д(0) e^{-\frac{t}{T_{д1}}} + k_{д} u_{y1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{д1}}} \right), \quad \dot{\psi} = \dot{\psi}_д k_{ред}, \quad \psi = \psi(0) + \dot{\psi} t, \quad x_{\theta} = \theta_{пр} - \theta,$$

$$u_{ду2} = k_{ду} x_{\theta}, \quad u_{y2} = k_{y2} u_{ду2}, \quad \ddot{\theta}_д = \ddot{\theta}_д(0) e^{-\frac{t}{T_{д2}}} + \frac{k_{д}}{T_{д2}} (u_{y2} - u_{y2}(0)) e^{-\frac{t}{T_{д2}}}, \quad \ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_д k_{ред},$$

$$\ddot{\theta}_2 = \sin \theta \cos \theta, \quad \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2, \quad \dot{\theta} = \dot{\theta}(0) + \ddot{\theta} t, \quad \theta = \theta(0) + \dot{\theta} t.$$

Поскольку аналитическое решение вышеприведенной системы уравнений получить не удалось, моделирование проводилось численными методами.

ПРИМЕР РАСЧЕТА СИСТЕМЫ

Платформа и ОЭП представляют собой однородные цилиндры с моментами инерции $I_{z,пл} = 12,5 \text{ кгм}^2$, $I_{z,в} = 33,671 \text{ кгм}^2$. Следящие системы для платформы и ОЭП рассчитываем как автономные, без учета влияния перекрестных связей. Для разворота платформы выбираем двигатель постоянного тока МИ-11. В соответствии с методикой, изложенной в литературе по проектированию следящих систем, находим параметры:

- коэффициент передачи датчика угла 0,1 В/град;
- коэффициент передачи двигателя 300 град/(Вс);
- постоянная времени двигателя 0,2 с;
- коэффициент передачи редуктора 0,01.

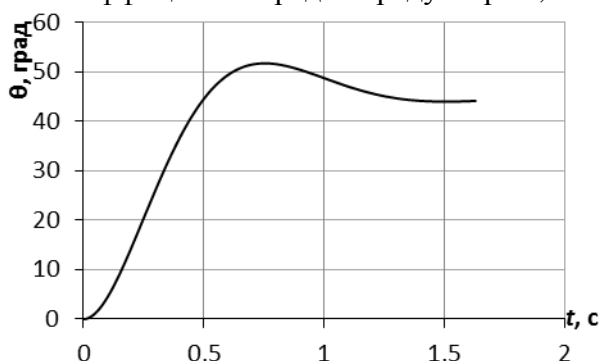


Рис. 7. Переходный процесс при автономном развороте платформы

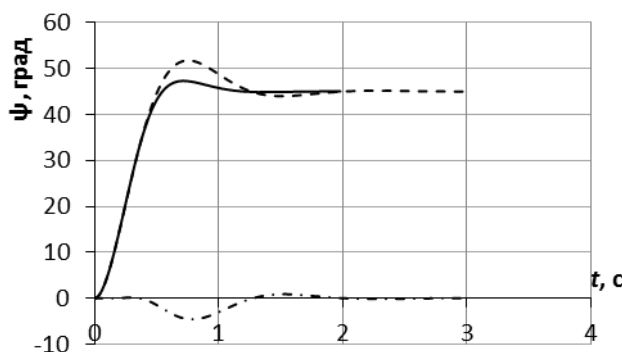


Рис. 8. Переходные процессы для платформы при совместном развороте

Для обеспечения перерегулирования 15% по формуле (25) находим требуемый коэффициент усиления усилителя $k_{y1} = 15$. Переходный процесс приведен на рис. 7. Длительность переходного процесса составляет 1,61 с.

Аналогично может быть проведена разработка следящей системы для разворота ОЭП в предположении, что при движении ОЭП поддерживается нулевая угловая скорость платформы. Параметры следящей системы с обеспечением перерегулирования 15% следующие:

- коэффициент передачи датчика угла 0,1 В/град;
- коэффициент передачи двигателя 300 град/(Вс);
- постоянная времени двигателя 0,16 с;
- коэффициент передачи редуктора 0,01;
- коэффициент усиления усилителя 19.

Переходный процесс по виду ничем не отличается от процесса, изображенного на рис. 7. Длительность переходного процесса составляет 1,26 с.

Таким образом, при раздельном последовательном развороте сначала платформы на угол 45 градусов, затем ОЭП на угол 60 градусов общее время разворота составляет 2,89 с.

Процессы при одновременном развороте платформы и ОЭП приведены на рис. 8 и 9.

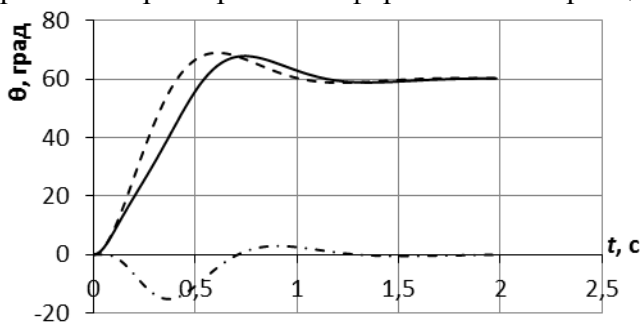


Рис. 9. Переходные процессы для ОЭП при совместном развороте

На рис. 8 приведены процессы для платформы. Штриховой линией выделен процесс при автономном развороте, сплошной – процесс при совместном развороте, штрихпунктирной – разность процессов, т. е. вклад, вносимый перекрестной связью. Длительность переходного процесса для платформы при совместном развороте составляет 0,97 с. Уменьшение длительности переходного процесса объясняется уменьшением суммарного момента инерции при

подъеме ОЭП, вследствие чего уменьшается постоянная времени двигателя, что приводит к повышению быстродействия.

На рис. 9 приведены процессы для ОЭП. Штриховой линией выделен процесс при автономном развороте, сплошной – процесс при совместном развороте, штрихпунктирной – разность процессов, т.е. вклад, вносимый перекрестной связью. Длительность переходного процесса для ОЭП при совместном развороте составляет 1,14 с. Увеличение длительности переходного процесса по сравнению с автономным разворотом объясняется влиянием центробежного момента, который препятствует подъему ОЭП.

Общая длительность переходного процесса при совместном развороте определяется длительностью разворота ОЭП и существенно меньше, чем длительность при последовательном раздельном развороте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическая модель рассмотренного объекта управления представляет собой систему двух дифференциальных уравнений второго порядка с нелинейными перекрестными связями. Физически перекрестные связи возникают из-за того, что разворот ОЭП по высоте меняет общий момент инерции подвижной системы, вследствие чего изменяются динамические характеристики поворота платформы, а при развороте платформы по азимуту возникает центробежный момент, влияющий на динамику разворота ОЭП. Существуют условия, при которых перекрестные связи оказывают незначительное влияние на основное движение. В этом случае математическая модель объекта управления представляет собой два независимых дифференциальных уравнения второго порядка. Синтез систем управления для этого случая хорошо описан в литературе по теории автоматического управления и особого интереса не представляет. Моделирование процессов в двухконтурной системе проводилось численным методом при различных начальных условиях и показало, что спроектированная без учета перекрестных связей система обеспечивает приемлемое качество переходных процессов как при раздельных, так и при совместных разворотах платформы и ОЭП. Во всех случаях длительность переходного процесса при совместном развороте, несмотря на влияние перекрестных связей, была меньше, чем при последовательных разворотах. Влияние перекрестных связей при совместных разворотах приводило как к ухудшению, так и к улучшению процессов. Увеличение угла высоты приводило к уменьшению общего момента инерции, что положительно сказывалось на процессе разворота платформы, а центробежный момент при повороте платформы препятствовал увеличению угла высоты, но способствовал его уменьшению. Существенный интерес представляет вопрос формирования алгоритма управления с учетом информации о факторах, вызывающих перекрестные связи, для устранения при необходимости их влияния. Не вызывает сомнения, что в этом случае возможно улучшение качества переходных процессов, в том числе и быстродействия. Однако это предмет отдельного исследования и выходит за рамки настоящей статьи.

Список используемых источников

1. *Иишинский А.Ю.* Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 670 с.
2. *Бутенин Н.В., Луиц Я.Л., Меркин Д.Р.* Курс теоретической механики. – СПб.: Лань, 2008. – 729 с.
3. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – 4-е изд. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
4. *Бесекерский В.А.* Динамический синтез систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1970. – 576 с.

П.В. Калабин,
Ю.А. Кузьмичев,
кандидат тех. наук, доцент;
А.С. Шабалатов

МЕТОД ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «РУЛЕВОЙ ПРИВОД – КАМЕРА ДВИГАТЕЛЯ»

Представлена математическая модель системы «рулевой привод – камера двигателя», в которой возможно возникновение резонанса при совпадении частот собственных колебаний двигателя и колебаний, поступающих на вход системы. Предложены способы модернизации системы стабилизации ракеты-носителя, препятствующие возникновению резонанса. Поскольку ракета-носитель проходит испытания, предлагаются способы изменения характеристик системы путем незначительных изменений, не требующих дорогостоящих затрат.

Ключевые слова: рулевой привод, камера двигателя, математическая модель, резонанс, меандр.

ВВЕДЕНИЕ

В разработке и изготовлении изделий ракетно-космической техники принимают участие большое количество предприятий и организаций. При этом составные части изделий проектируются, изготавливаются и проходят испытания автономно, независимо друг от друга. Совместимость отдельных составных частей проверяется при комплексных испытаниях. Однако в некоторых случаях при испытаниях в земных условиях невозможно создать условия аналогичные тем, в которых приходится функционировать изделию. Совместимость различных систем и агрегатов, как правило, рассчитывается по основным параметрам. При совместной работе отдельных частей изделия возможно проявление неучтенных вторичных параметров на работоспособность всего изделия в целом. Нередко эти особенности, нюансы проявляются только в результате летно-конструкторских испытаний. В этом случае несовместимость отдельных частей изделия может заставить изменить конструкцию отдельных агрегатов, т. е. фактически разработать новый агрегат или систему. Это существенно увеличивает время и стоимость разработки изделия. Поэтому актуальной является задача минимальными, незначительными доработками отдельных агрегатов преодолеть несовместимость, выявленную на этапе летно-конструкторских испытаний.

Рассмотрим случай, возникший при разработке системы управления ракеты-носителя «Союз-2.1б», в которой алгоритмы управления, рулевой привод и двигатель третьей ступени разработали различные организации. Для повышения точности системы стабилизации в управляющие воздействия были включены периодические сигналы с целью линеаризации зоны нечувствительности рулевого привода. Частота периодических сигналов определялась характеристиками бортовой вычислительной машины. При этом выбранная частота управляющих воздействий оказалась кратной собственной частоте колебаний камеры двигателя. Следовательно, имеем ситуацию, при которой в полете ракеты-носителя может возникнуть резонанс, который существенно увеличит нагрузки на элементы двигателя. Это может привести к его разрушению. Замена характеристик отдельных элементов потребует использования других составных частей. В статье рассмотрены варианты исключения возможности возникновения резонанса путем минимальных доработок.

Для исследования влияния управляющих воздействий, создаваемых системой управления движением ракеты-носителя на вибронагрузки системы «рулевой привод – камера двигателя» была разработана и исследована математическая модель.

Структурная схема представлена на рис. 1.

Рулевой привод (РП) представлен в виде рулевой машины, динамические свойства которой описываются апериодическим звеном второго порядка. Рулевая машина охвачена отри-

цательной обратной связью с коэффициентом K_{oc} . Выходной сигнал рулевой машины соответствует механическому перемещению штока на длину δ .

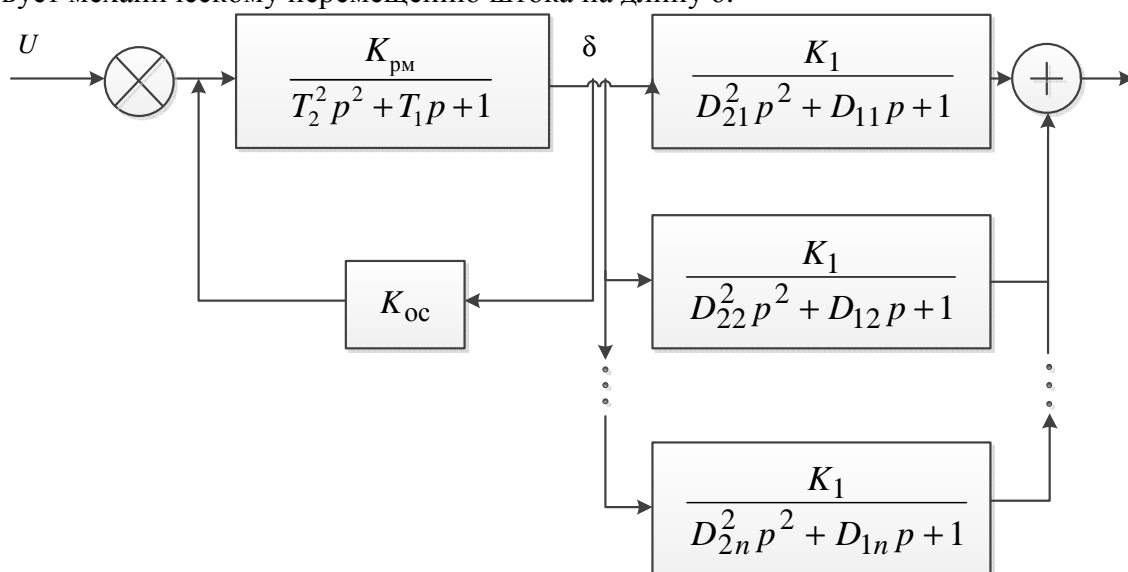


Рис. 1. Структурная схема системы «Рулевой привод – камера двигателя»

Коэффициенты передаточной функции зависят от конструктивных параметров рулевой машины, характеристик нагрузки, расхода рабочей жидкости через электрогидравлическую машину и т. п. В рассматриваемой модели значения коэффициентов принимались по данным прототипов рулевых приводов [1].

Передаточная функция рулевой машины имеет следующий вид:

$$W_{рм}(p) = \frac{K_{рм}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

На рулевой привод поступает управляющее воздействие в виде тока управления рулевой машиной. На входной сигнал для линеаризации зоны нечувствительности и повышения точности системы стабилизации накладывается периодическое воздействие. Периодическая функция характеризуется амплитудой 4 мА, частотой 8,33 Гц и формой в виде прямоугольных симметричных сигналов, меандров. Параметры периодической функции соответствуют реальным параметрам системы стабилизации ракеты-носителя.

Управляющее воздействие формируется системой управления движением РН. Механическое перемещение штока рулевой машины воздействует на камеру двигателя. Двигатель является источником вибрации. Процессы, происходящие в камере сгорания ракетного двигателя, возбуждают колебания, которые характеризуются спектром частот и амплитуд различного значения.

Математическая модель камеры двигателя в рассматриваемом случае представлена набором осцилляторов, которые характеризуют собственные параметры колебания камеры двигателя. Динамические процессы колебаний камеры двигателя представлены в виде набора аperiodических звеньев второго порядка:

$$W(p) = \frac{K_i}{D_{2i}^2 p^2 + D_{1i} p + 1},$$

где i – номер осциллятора;

D_{2i} – коэффициент, характеризующий собственную частоту колебаний i -го осциллятора
 $\nu = 1/2\pi D_{2i}$;

D_{1i} – коэффициент, характеризующий собственное демпфирование i -го осциллятора.

Рулевой привод камеры двигателя является исполнительным органом системы стабилизации ракеты-носителя (РН). В соответствии с управляющими воздействиями рулевой привод осуществляет поворот камеры двигателя для изменения направления вектора тяги. Рулевой привод представляет собой динамическое звено с ограничениями в виде зоны нечувствительности и зоны насыщения. Зона нечувствительности характеризуется минимальными значениями тока управления рулевой машиной, при котором изменяется выходной сигнал. На третьей ступени РН «Союз-2.1б» камеры двигателя имеют собственную частоту колебания около 25 Гц. При этом на входной управляющий сигнал, поступающий на рулевой привод, с целью линеаризации зоны нечувствительности накладывается периодический сигнал, имеющий форму меандра и частоту 8,33 Гц. Этот сигнал имеет третью гармонику, частота которой равна 24,99 Гц. Амплитуда третьей гармоники периодического сигнала составляет 0,42 амплитуды меандра. Таким образом, в силу близости частот собственных колебаний камеры двигателя (около 25 Гц) и частоты третьей гармоники периодического сигнала (24,99 Гц) возможно появление резонанса в полете РН. Это приведет к существенному увеличению нагрузок на элементы конструкции камеры двигателя и даже может стать причиной ее разрушения. Следовательно, целесообразно предложить ряд мер по модернизации системы стабилизации для исключения возможности возникновения резонанса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для оценки влияния частоты качания камеры на динамические свойства системы «рулевой привод – камера двигателя» рассмотрим методы и способы недопущения возникновения резонанса в системе. Существуют три возможных направления модернизации:

- изменение частоты собственных колебаний камеры двигателя;
- изменение частоты входных сигналов;
- изменение формы входных сигналов.

Изменение частоты собственных колебаний камеры двигателя требует существенного изменения конструкции двигателя, так как частоты собственных колебаний зависят от формы, размеров камеры и режимов работы двигателя. Этот способ исключения возникновения резонанса в исследуемой системе потребует больших финансовых и временных затрат.

Увеличение частоты периодических входных сигналов потребует замены бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ), так как частота вибрационных сигналов непосредственно зависит от тактовой частоты БЦВМ. Этот способ также требует существенных финансовых и временных затрат. Уменьшение частоты вибрационных сигналов возможно с помощью делителей частоты. Например, использование делителя частоты с коэффициентом два приводит к снижению частоты вибрационных колебаний до значения 4,17 Гц, тогда частота собственных колебаний камеры двигателя 25 Гц будет шестой гармоникой. Поскольку форма вибрационных сигналов симметрична – амплитуда четных гармоник в разложении Фурье равна нулю. Это исключает возможность возникновения резонанса в системе «рулевой привод – камера двигателя», но требует дополнительных исследований для анализа влияния колебаний частотой 4,17 Гц на остальные элементы конструкции РН.

Из вышесказанного следует целесообразность рассмотрения возможных способов изменения формы вибрационных сигналов для исключения возникновения резонанса в системе «рулевой привод – камера двигателя». С этой целью была разработана и исследована математическая модель и определено влияние параметров управляющих воздействий на динамические свойства рассматриваемой системы.

Как известно, на вход рулевого привода поступает управляющее воздействие в виде тока управления рулевой машины. Входной сигнал формируется системой управления. Он зада-

ется в виде периодической функции, которая характеризуется амплитудой 4 мА и частотой 8,33 Гц. Исследуем следующие формы управляющих периодических воздействий:

- прямоугольные импульсы (меандры);
- синусоидальный сигнал;
- экспоненциальные импульсы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прямоугольные импульсы (меандры). При наличии в спектре двигателя собственной частоты колебаний, значение которой близко к значению 24,99 Гц, управляющие воздействия, поступающие на вход рулевого привода в форме прямоугольных импульсов, имеют третью гармонику (рис. 2, а) и становятся причиной появления резонанса в системе «рулевой привод – камера двигателя» (рис. 2, б). Это приводит к многократному увеличению нагрузок на конструкцию двигателя.

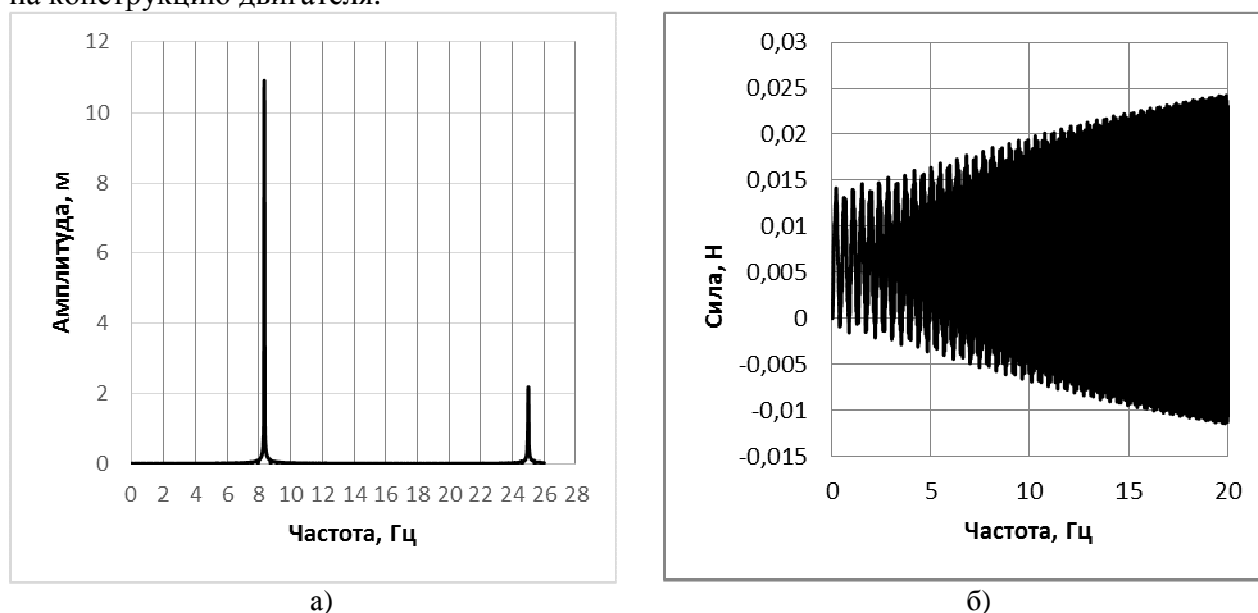


Рис. 2. Исследование меандров:

а – амплитудно-частотная характеристика меандра с частотой 8,33 Гц;

б – выходной сигнал при подаче на вход меандров с частотой 8,33 Гц

Синусоидальный сигнал. Синусоидальный сигнал не имеет высших гармоник (рис. 3, а). Использование такого способа исключает возможность появления резонанса в рассматриваемой системе (рис. 3, б). Его реализация потребует применение специального генератора синусоидальных сигналов в цепи управления рулевым приводом. К недостаткам предложенного варианта можно отнести наличие несимметричности в синусоидальном сигнале, которое потребует принятия специальных мер для обеспечения точности функционирования системы стабилизации РН.

Экспоненциальные импульсы. Рулевой привод с точки зрения теории электрических цепей представляет активно-индуктивную нагрузку, причем значение активного сопротивления РП многократно превышает значение индуктивного сопротивления. Следовательно, прямоугольные сигналы напряжения, формируемые БЦВМ, будут формировать ток управления рулевым приводом. Форма тока будет незначительно отличаться от меандров (прямоугольных импульсов). Повышение индуктивности цепи управления РП приводит к сглаженности переднего фронта импульса силы тока. Индуктивное сопротивление не дает резко изменяться силе тока и, следовательно, форма вибрационных импульсов будет пред-

ставлять экспоненциальную зависимость от времени. У таких сигналов при их разложении в ряд Фурье на третьей гармонике частота амплитуды близка к нулевому значению (рис. 4, а). Значение амплитуды третьей гармоники уменьшается многократно по сравнению с прямоугольными импульсами. Это существенно снижает нагрузки на конструкцию двигателя (рис. 4, б). Реализация рассмотренного способа изменения динамических характеристик системы «рулевой привод – камера двигателя» требует включения в цепь управления РП индуктивности. Значение индуктивности можно выбрать из условия $\tau = 0,5T_{ц}$, где τ – постоянная времени, значение которой зависит от значения активного сопротивления РП и значения индуктивности, в введенной в цепь управления рулевого привода, $T_{ц} = 16,66$ Гц – половина периода вибрационных колебаний.

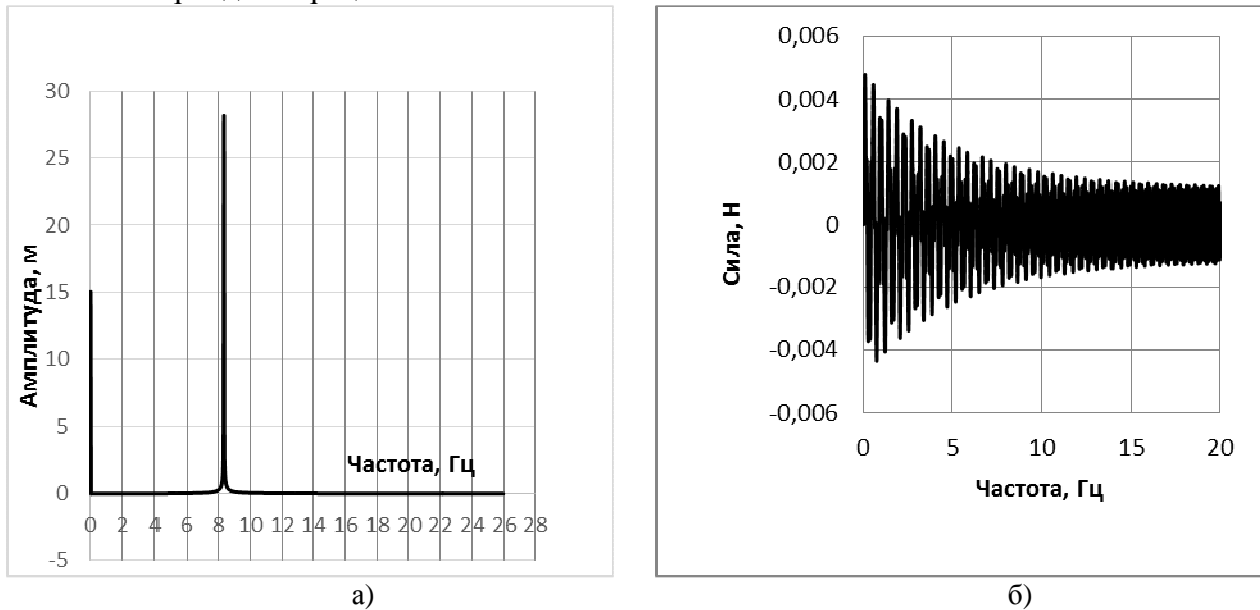


Рис. 3. Исследование синусоидального сигнала:

а – амплитудно-частотная характеристика синусоидального сигнала с частотой 8,33 Гц;
б – выходной сигнал при подаче на вход синусоидального сигнала с частотой 8,33 Гц

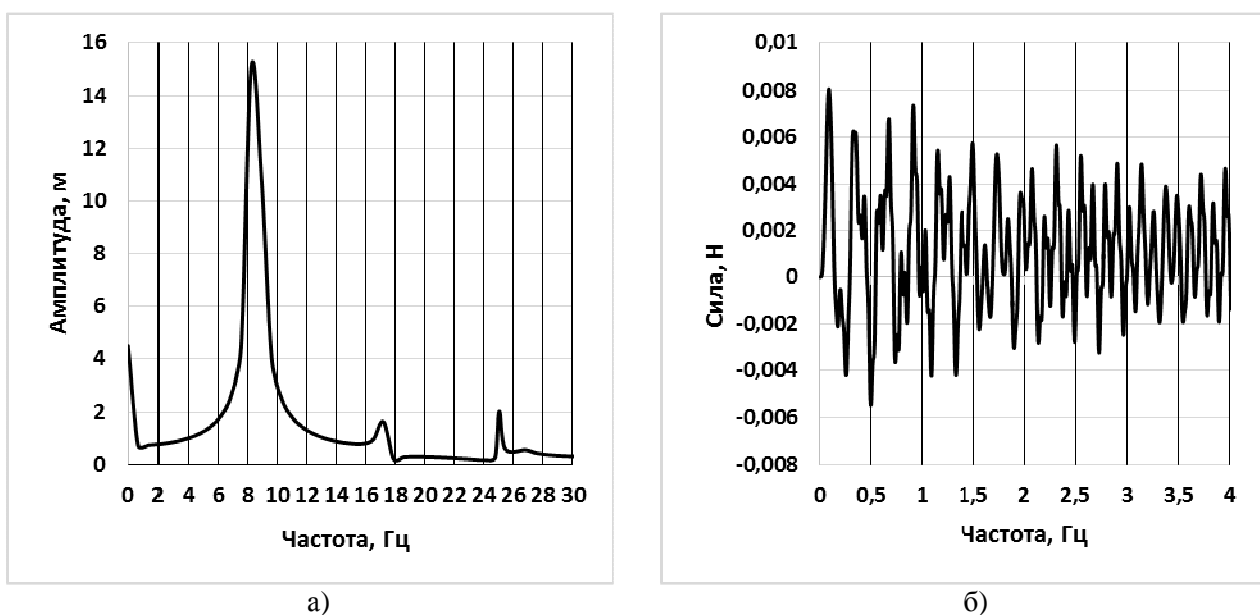


Рис. 4. Исследование экспоненциальных импульсов:

а – амплитудно-частотная характеристика экспоненциальных импульсов с частотой 8,33 Гц;
б – выходной сигнал при подаче на вход экспоненциальных импульсов с частотой 8,33 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены основные способы изменения динамических характеристик системы «рулевой привод – камера двигателя» с целью исключения возможности возникновения резонанса.

2. При наличии в спектре двигателя собственной частоты колебаний, значение которой близко к значению 24,99 Гц, управляющие воздействия, поступающие на вход рулевого привода в форме прямоугольных импульсов, могут привести к резонансным явлениям в системе «рулевой привод – камера двигателя». Это приведет к многократному увеличению нагрузок на конструкцию двигателя.

3. Предлагается два способа исключения возможности возникновения резонанса в системе «рулевой привод – камера двигателя» за счет изменения формы управляющих воздействий, формируемых системой управления движением РН.

4. Способ изменения динамических характеристик системы «рулевой привод – камера двигателя» с помощью введения в цепь управления рулевого привода индуктивного сопротивления требует незначительных ресурсов как финансовых, так и временных.

5. Необходимо продолжить исследования влияния механического перемещения камеры двигателя на внутрикамерные процессы, протекающие в камере сгорания.

Список используемых источников

1. Кузнецов В.П., Лукьянец С.В., Крупская М.А. Теория автоматического управления. Конспект лекций: учеб.-метод. пособие: в 2 ч. – Минск: БГУИР, 2007. – Ч. 1: Линейные непрерывные системы. – 132 с.

2. Кузнецов В.П. Линейные импульсные системы: математическое описание: тексты лекций по курсу «Теория автоматического управления» для студентов специальности «Автоматика и управление в технических системах». – Минск: БГУИР, 1996. – 70 с.

3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.

4. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического управления. – М.: Наука, 1979. – 256 с.

5. Савин М.М., Елсуков В.С., Пятин О.Н. Теория автоматического управления: учеб. пособие / под ред. В.И. Лачина. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 469 с.

6. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – Т. 5. – 784 с.

Г.Н. Мальцев,
доктор техн. наук, профессор;
Д.В. Склемин,
кандидат техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ УНИФИЦИРОВАННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПО ЦЕНЗУРИРОВАННОЙ ВЫБОРКЕ ДАННЫХ ОБ ОТКАЗАХ

Представлены основные соотношения для оценивания интенсивности отказов высоконадежных унифицированных радиоэлектронных систем по цензурированной выборке данных об отказах группы радиоэлектронных систем методом Каплана – Мейера и для проверки соответствия интенсивности отказов наблюдаемой радиоэлектронной системы среднегрупповой интенсивности отказов. Для получения оценок параметров закона распределения времени безотказной работы статистика наработок представляется в виде матрицы наработок. Закон распределения времени наработки на отказ полагается экспоненциальным, а поток отказов отдельной радиоэлектронной системы и суммарный поток отказов группы радиоэлектронных систем полагаются пуассоновскими. Показано, что вследствие редких отказов высоконадежных радиоэлектронных систем время накопления статистических данных составляет до нескольких лет, и использование цензурированной выборки позволяет сократить требуемое время накопления данных по сравнению с использованием стандартных методов статистического анализа примерно в 2,5 раза. При сроках эксплуатации более десяти лет это позволяет значительную часть срока эксплуатации радиоэлектронных систем использовать при планировании мероприятий технической эксплуатации полученные и постоянно уточняемые оценки параметров законов распределения времени их безотказной работы.

Ключевые слова: унифицированные радиоэлектронные системы, надежность, интенсивность отказов, цензурированная выборка.

В рамках типового жизненного цикла технических систем их надежность закладывается в принимаемые технические решения при проектировании, обеспечивается при создании и поддерживается в процессе эксплуатации [1, 2]. Среди современных радиоэлектронных систем (РЭС) можно выделить высоконадежные малосерийные РЭС, представляющие собой сложные технические системы с непрерывным режимом применения по назначению. К числу таких РЭС относятся наземные РЭС космического назначения, такие, как командно-измерительные системы управления космическими аппаратами и радиолокационные системы контроля воздушно-космического пространства [3, 4]. Они создаются в виде унифицированных рядов РЭС, количество экземпляров которых составляет от 2–3 до 15–20 единиц, на основе использования единой платформы проектирования и в силу функционального назначения и предъявляемых требований по эксплуатационно-техническим характеристикам являются высоконадежными изделиями.

Для высоконадежных РЭС характерен редкий характер отказов, однако при этом не исключается наличие скрытых отказов. Это приводит к малому объему выборки данных об отказах каждого из изделий, необходимой для определения параметров законов распределения времени их безотказной работы. Поэтому сбор информации об отказах начинается на этапе испытаний и экспериментальной отработки таких РЭС и продолжается в течение всего периода их эксплуатации. Это необходимо, с одной стороны, для уточнения эксплуатационных свойств РЭС и учета выявленных особенностей их «надежностного поведения» при создании аналогов и РЭС следующего поколения, с другой стороны, для прогнозирования вероятности их безотказной работы и текущего планирования мероприятий технической эксплуатации РЭС, в том числе проведения технического обслуживания по состоянию.

Направление унификации расширяет возможности сбора информации об отказах для анализа надежности малосерийных унифицированных РЭС. В настоящей статье рассматривает-

ся методика определения параметра закона распределения времени безотказной работы однотипных унифицированных РЭС по цензурированной выборке данных об отказах группы РЭС. Цензурирование позволяет использовать данные об отказах всех унифицированных РЭС, входящих в группу, и получить приемлемые по точности оценки при малом объеме выборки данных по каждому изделию.

Направление унификации и использования единой платформы проектирования РЭС расширяет возможности сбора информации о надежности аппаратуры для анализа надежности малосерийных РЭС. При выполнении условия однородности данных, получаемых в процессе эксплуатации группы однотипных унифицированных РЭС, они могут совместно использоваться для расширения выборки исходных данных при анализе и прогнозировании надежности РЭС в условиях редких отказов и малой выборки данных по каждому изделию.

Основным законом распределения, используемым при описании надежности радиоэлектронной аппаратуры, является экспоненциальный закон распределения [5, 6]. Он же предполагается и при разработке динамических марковских моделей, описывающих эксплуатационные процессы РЭС в пространстве состояний. Вероятность безотказной работы в момент времени t при экспоненциальном распределении времени наработки на отказ определяется выражением $P(t) = \exp(-\lambda t)$ с параметром λ – интенсивность отказов. Поэтому в предположении экспоненциального распределения времени наработки на отказ оцениваемым параметром является интенсивность отказов РЭС λ .

В математической статистике предлагается несколько методов для получения точечной оценки параметра λ экспоненциального распределения. Задача решается известными методами статистического анализа при условии, что исследуемые выборки данных однородные и имеют объем, необходимый для использования статистических методов обработки экспериментальных данных [7, 8]. Одним из наиболее распространенных и эффективных методов оценивания неизвестных параметров систем и сигналов по экспериментальным данным и измерительной информации является метод максимального правдоподобия. Общее описание этого метода представлено в работах [8, 9]. Сущность использования метода максимального правдоподобия при решении рассматриваемой задачи определения параметра закона распределения времени безотказной работы РЭС по результатам эксплуатации – данным об отказах – состоит в следующем.

Пусть в течение интервала времени наработки T зарегистрированы отказы РЭС в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m . Величины $t_i, i=1, 2, \dots, m$, являются случайными величинами. Поэтому вектор $\mathbf{X}=(t_1, t_2, \dots, t_m)$ можно рассматривать как реализацию многомерной случайной величины. Если известна функция распределения наработки на отказ для одной РЭС $f(t, \mathbf{A})$, зависящая в общем случае от совокупности k параметров, образующих вектор $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_k)$, то можно составить выражение для вероятности того, что в ходе эксплуатации отказы произойдут в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m :

$$P\{t_1 \leq T_1 < t_1 + dt_1, t_2 \leq T_2 < t_2 + dt_2, \dots, t_m \leq T_m < t_m + dt_m\} = p(t_1, t_2, \dots, t_m, \mathbf{A}) dt_1 dt_2 \dots dt_m, \quad (1)$$

где $p(t_1, t_2, \dots, t_m, \mathbf{A})$ – многомерная плотность распределения случайного вектора времен наступления отказов $\mathbf{T}=(T_1, T_2, \dots, T_m)$. Если зафиксировать значения $t_i, i=1, 2, \dots, m$ такими, какими они оказались на самом деле в ходе эксплуатации, и изменять значения совокупности параметров \mathbf{A} в некотором интервале, то плотность распределения $p(t_1, t_2, \dots, t_m, \mathbf{A})$ будет иметь максимум. В соответствии с принципом максимального правдоподобия оптимальная оценка $\hat{\mathbf{A}}=(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_k)$ параметров a_1, a_2, \dots, a_k должна обладать следующим свойством: обеспечить максимальное значение плотности вероятности времен наступления отказов,

$$p(t_1, t_2, \dots, t_m, \hat{\mathbf{A}}) = \max_{(\mathbf{A})} p(t_1, t_2, \dots, t_m, \mathbf{A}). \quad (2)$$

В частном случае однопараметрического экспоненциального распределения $k=1$ и оцениваемым параметром плотности вероятности времен наступления отказов является интенсивность отказов $a_1=\lambda$.

Удобнее определять не максимум функции $p(\mathbf{A})$, а максимум ее логарифма $\ln p(\mathbf{A})$. Функция $L(\mathbf{A}) = \ln p(\mathbf{A})$ называется функцией правдоподобия. Для функции правдоподобия задача определения точечной оценки $\hat{\mathbf{A}}$ совокупности параметров плотности распределения $p(t_1, t_2, \dots, t_m, \mathbf{A})$ формулируется аналогично выражению (2): оптимальная оценка $\hat{\mathbf{A}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_k)$ параметров a_1, a_2, \dots, a_k должна обеспечивать максимальное значение функции правдоподобия

$$L(t_1, t_2, \dots, t_m, \hat{\mathbf{A}}) = \max_{(\mathbf{A})} L(t_1, t_2, \dots, t_m, \mathbf{A}). \quad (3)$$

Точка $\hat{\mathbf{A}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_k)$ в области значений совокупности параметров \mathbf{A} , обеспечивающая $\max_{(\mathbf{A})} L(\mathbf{A})$, находится градиентным методом, в соответствии с которым оценка $\hat{\mathbf{A}}$ является решением системы k уравнений правдоподобия

$$\frac{d}{da_i} L(t_1, t_2, \dots, t_m, a_1, a_2, \dots, a_k) = 0, \quad i=1, 2, \dots, k, \quad (4)$$

В случае однопараметрического экспоненциального распределения с параметром λ необходимо решить одно уравнение правдоподобия

$$\frac{d}{d\lambda} L(t_1, t_2, \dots, t_m, \lambda) = 0. \quad (5)$$

Результатом решения уравнения правдоподобия (5) является оптимальная оценка интенсивности отказов $\hat{\lambda}$.

Получим выражение для оптимальной оценки интенсивности отказов $\hat{\lambda}$ по данным эксплуатации группы N однотипных изделий, в частности, унифицированных РЭС. При оценивании полагается, что наблюдение за процессом эксплуатации проводится в течение интервала времени T , отказавшие РЭС немедленно восстанавливаются, каждая РЭС имеет интенсивность отказов λ , интервалы между отказами всех N РЭС группы распределены по экспоненциальному закону с параметром $N\lambda$, а в интервале времени (t_m, T) все изделия проработали безотказно. Величина суммарной интенсивности отказов $\lambda_{\Sigma} = N\lambda$ для группы из N изделий соответствует определению интенсивности потока событий для суммы N простейших потоков, каждый с интенсивностью λ .

Выражение для элемента вероятности того, что в ходе эксплуатации группы РЭС отказы произойдут в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} p(t_1, t_2, \dots, t_m, \lambda) dt_1 dt_2 \dots dt_m &= (N\lambda e^{-N\lambda t_1} dt_1)(N\lambda e^{-N\lambda t_2} dt_2) \dots (N\lambda e^{-N\lambda t_m} dt_m) e^{-N\lambda(T-t_m)} = \\ &= (N\lambda)^m e^{-N\lambda T} dt_1 dt_2 \dots dt_m. \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражения (6) можно найти зависящую от λ функцию правдоподобия

$$L(\lambda) = m \ln(N\lambda) - N\lambda T. \quad (7)$$

Уравнение правдоподобия для полученной функции правдоподобия (7) имеет следующий вид:

$$\frac{dL(\lambda)}{d\lambda} = \frac{m}{\lambda} - NT. \quad (8)$$

Решением уравнения правдоподобия (8) является точечная оценка интенсивности отказов для группы РЭС анализируемого типа

$$\hat{\lambda} = \frac{m}{NT}. \quad (9)$$

Из полученного выражения (9) для оценки максимального правдоподобия интенсивности отказов РЭС $\hat{\lambda}$ следует, что достаточной статистикой для ее определения является число отказов всех изделий m , определяющее размерность вектора $\mathbf{X} = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ исходных данных о зарегистрированных отказах группы РЭС.

Оценка интенсивности отказов РЭС $\hat{\lambda}$, формируемая в соответствии с выражением (9), является точечной оценкой. При малом объеме выборки точечная оценка может быть неустойчива, обладает большой дисперсией и, как следствие, может создавать неверное представление о действительном значении оцениваемого параметра – интенсивности отказов РЭС. Поэтому необходимо проверять надежность оценок интенсивностей отказов при малом объеме выборки с помощью доверительных интервалов. Двусторонним доверительным интервалом для параметра λ с коэффициентом доверия δ называют интервал (λ_n, λ_b) с нижней и верхней границами λ_n и λ_b такими, что вероятность нахождения в этом интервале неизвестного значения λ оказывается не менее заданной доверительной вероятности δ : $P(\lambda_n < \lambda < \lambda_b) > \delta$. При этом вероятности $\gamma' = P(0 < \lambda < \lambda_n)$ и $\gamma'' = P(\lambda_b < \lambda < 1)$ являются уровнями значимости при определении нижней и верхней границ λ_n и λ_b соответственно. Они связаны с доверительной вероятностью соотношением $\delta + \gamma' + \gamma'' = 1$.

Определим значения границ доверительных границ параметра экспоненциального распределения λ с помощью стандартного метода Клоппера – Пирсона [10]. Достаточная статистика m отказов для всех РЭС группы в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m распределена по закону Пуассона с параметром $a = N\lambda T$. Верхнему и нижнему уровням значимости γ' и γ'' соответствуют значения параметра $a_n = N\lambda_n T$ и $a_b = N\lambda_b T$ соответственно. Выражения для вероятностей γ' и γ'' (уравнения Клоппера – Пирсона) имеют вид

$$\sum_{i=0}^m \frac{(N\lambda_n T)^i}{i!} e^{-N\lambda_n T} = \gamma', \quad (10)$$

$$\sum_{i=m}^{\infty} \frac{(N\lambda_b T)^i}{i!} e^{-N\lambda_b T} = \gamma''. \quad (11)$$

При этом уравнение (11) для вероятности γ'' преобразуется к виду

$$\sum_{i=0}^{m-1} \frac{(N\lambda_b T)^i}{i!} e^{-N\lambda_b T} = 1 - \gamma''. \quad (12)$$

Нижняя и верхняя границы доверительного интервала параметра экспоненциального распределения λ находятся с помощью таблиц распределения Пуассона для уровней значимости γ' и γ'' по значениям параметров a_n и a_b . Для этого в соответствии с числом отказов всех изделий m по таблицам распределения Пуассона находится ближайшее к значению уровня значимости γ' число, по которому определяется величина a_n , и по формуле $\lambda_n = \frac{a_n}{NT}$ определяется нижняя граница параметра экспоненциального распределения. Верхняя граница доверительного интервала определяется аналогично по формуле $\lambda_b = \frac{a_b}{NT}$, при этом для определения по таблицам распределения Пуассона величины a_b используется число $(m-1)$ и величина $(1-\gamma'')$. При $m=0$ нижняя граница $\lambda_n=0$, а верхняя граница определяется по формуле $\lambda_b = -\frac{\ln(1-\delta)}{NT}$.

Будем полагать, что типовое значение интенсивности отказов высоконадежной РЭС составляет $\lambda=10^{-5}$ час $^{-1}$. При доверительной вероятности $\delta=0,95$ для подтверждения заданного уровня интенсивности отказов $\lambda=10^{-5}$ час $^{-1}$ для группы из $N=20$ унифицированных РЭС при безотказной работе всех РЭС, необходимо проводить сбор статистических данных о наработке и отказах в течение 1 года и 4 месяцев. Для группы из $N=14$ РЭС это время составит 1 год и 9 месяцев, а для группы из $N=7$ РЭС – 3 года и 8 месяцев.

Таким образом, при использовании стандартного метода Клоппера – Пирсона для высоконадежных малосерийных РЭС время накопления статистических данных в рассмотренных условиях составляет до нескольких лет, а с увеличением надежности аппаратуры РЭС и уменьшением интенсивности отказов λ требуемое время накопления необходимого объема

статистической информации еще более увеличивается. Вместе с тем, при характерных для наземных РЭС космического назначения длительных сроках эксплуатации более десятка лет это позволяет по мере накопления статистической информации значительную часть срока эксплуатации использовать при планировании мероприятий технической эксплуатации полученные и постоянно уточняемые оценки параметров законов распределения времени их безотказной работы.

В реальных условиях эксплуатационная информация о наработке и отказах высоконадежных РЭС содержит наработки как отказавших РЭС, так и не отказавших РЭС. Для получения надежных оценок интенсивностей отказов РЭС по малой выборке необходимо использование и тех, и других. Это позволяет сделать, например, метод Каплана – Мейера [11]. Он отражает современные подходы теории статистического анализа и основан на объединении наработок как отказавших, так и не отказавших изделий в общую совокупность – цензурированную выборку.

Цензурированием называется событие, приводящее к прекращению наблюдений за изделием до наступления системного события (например, отказа) либо к свершению события в неизвестный момент времени в пределах некоторого интервала. Цензурированной выборкой называется выборка, элементами которой являются полные наработки и неполные наработки до цензурирования. Полной наработкой является наработка изделия от начала некоторого этапа его эксплуатации до системного события, например, наработка до отказа. Неполная наработка характеризует наработку изделия либо от начала эксплуатации до фиксированного момента времени, но до наступления системного события, либо от некоторого произвольного момента времени, не связанного с системным событием, до системного события или до конкретного момента времени.

Применительно к задачам оценки надежности РЭС по результатам наблюдений в процессе эксплуатации цензурирование связано с ограниченностью интервалов наблюдения. В рассматриваемом случае анализа данных о наработке группы унифицированных РЭС цензурированную выборку образуют отказы РЭС, вводимых в эксплуатацию в различные моменты времени. Исходной информацией для расчета интенсивности отказов РЭС по методу Каплана – Мейера являются: наработки до отказа анализируемой группы унифицированных РЭС, количество отказавших РЭС в момент наблюдения, количество и наработки не отказавших РЭС. Для получения оценок параметров закона распределения времени безотказной работы РЭС статистика наработок представляется в виде матрицы наработок

$$\mathbf{H} = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & j & \dots & m \\ t_1 & t_2 & t_3 & \dots & t_j & \dots & t_m \\ \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_3 & \dots & \varepsilon_j & \dots & \varepsilon_m \end{vmatrix}, \quad (13)$$

где j – порядковый номер элемента вариационного ряда наработок, $j=1, 2, \dots, m$;

t_j – наработка РЭС до j -го отказа ($t_j \leq t_{j+1}$);

ε_j – индикаторные значения, которые полагаются равными $\varepsilon_j=1$ при зафиксированном в момент времени t_j отказе наблюдаемой РЭС и равными $\varepsilon_j=0$ при наблюдении в момент времени t_j отказа другой РЭС (изделия-аналога);

m – объем цензурированной выборки.

Анализ цензурированной выборки отказов РЭС позволяет непосредственно определить вид функции надежности и оценивать ее параметры. Чем больше определенность исходной матрицы наблюдений, т.е. чем больше единиц в индикаторном массиве значений ε_j , $j=1, 2, \dots, m$, тем точнее построенная по экспериментальным данным плотность распределения времени безотказной работы отражает фактический уровень безотказности РЭС. При этом наличие цензурированных наработок в общем массиве данных расширяет информационное пространство и позволяет более достоверно оценить безотказность анализируемой группы унифицированных РЭС.

Для экспоненциального закона распределения вероятности безотказной работы РЭС расчет интенсивности отказов по цензурированной выборке данных о наработке и отказах группы РЭС выполняется по формуле [11]:

$$\hat{\lambda} = d \left(\sum_{j=1}^m t_j \right)^{-1}. \quad (14)$$

где $d = \sum_{j=1}^m (\varepsilon_j | \varepsilon_j = 1)$ – общее количество отказов наблюдаемых изделий. По своей структуре

выражения (14) и (9) для оценки интенсивности отказов $\hat{\lambda}$ близки, однако если выражение (9) позволяет учитывать только зафиксированные отказы, то выражение (14) позволяет учитывать эксплуатационную информацию и об отказах, и о безотказной работе изделия.

Оценка интенсивности отказов $\hat{\lambda}$ вида (14) является случайной величиной, существенно зависящей от количества зарегистрированных отказов. Ее среднеквадратическое отклонение определяется по формуле

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\lambda_j - \hat{\lambda})^2}. \quad (15)$$

Для достоверных выводов об оцениваемом параметре – интенсивности отказов РЭС – следует использовать значение интенсивности отказов, соответствующего верхней границы доверительного интервала $\hat{\lambda}_B$, как наихудшее значение для оценки интенсивности отказов $\hat{\lambda}$ [12]:

$$\hat{\lambda}_B = \hat{\lambda} + t_{\delta, m} \frac{\sigma_{\lambda}}{\sqrt{m}}. \quad (16)$$

где $t_{\delta, m}$ – коэффициент Стьюдента для заданной доверительной вероятности δ и объема выборки m ;

$\hat{\lambda}$ – точечная оценка интенсивности отказов РЭС (14);

σ_{λ} – среднеквадратическое отклонение оценки интенсивности отказов РЭС (15).

Приведенная методика оценки интенсивности отказов изделия позволяет определить функцию его надежности методом Каплана – Мейера на основе цензурированной эксплуатационной информации, которая поступает от всех эксплуатируемых однотипных изделий. Увеличение количества наблюдаемых изделий и систематизация результатов наблюдения повышает точность определения интенсивности отказов изделий рассматриваемого типа.

Расчеты показывают, что для группы из $N=20$ унифицированных РЭС с заданной величиной интенсивности отказов $\lambda=10^{-5}$ час⁻¹ при безотказной работе всех РЭС и доверительной вероятности $\delta=0,95$ для достоверной оценки интенсивности отказов методом Каплана – Мейера с использованием цензурированной выборки необходимо проводить сбор статистических данных о наработке и отказах в течение 6-ти месяцев. Для группы из $N=14$ РЭС это время составит 9 месяцев, а для серии из $N=7$ РЭС – 1 год и 6 месяцев. С увеличением надежности РЭС и уменьшением интенсивности отказов λ , как и при использовании стандартных методов статистического оценивания, требуемое время накопления необходимого объема статистической информации увеличивается.

В рассмотренных условиях выигрыш во времени сбора статистических данных о наработке и об отказах группы унифицированных РЭС в составе от 7 до 20 единиц для накопления информации, необходимой для достоверной оценки интенсивности отказов РЭС, при использовании метода Каплана – Мейера и цензурированной выборки составляет по сравнению с использованием стандартных методов статистического анализа около 2,5 раз. Это, в свою очередь, позволяет на основе полученных оценок параметра закона распределения времени безотказной работы РЭС осуществить переход к гибкой стратегии проведения технического обслуживания в более ранние моменты времени с начала эксплуатации РЭС.

Для полученной точечной оценки интенсивности отказов $\hat{\lambda}$ конкретной РЭС (индивидуальный характер оценок интенсивности отказов РЭС по цензурированной выборке определяется индикаторными значениями ε_j , которые в зависимости от того, к наблюдаемой РЭС или к другой РЭС относится j -й отказ, принимают единичное или нулевое значение) может быть определено соответствие среднегрупповому значению интенсивности отказов. Для решения этого вопроса обычного сравнения точечных оценок интенсивностей отказов группы РЭС недостаточно, и необходимо решение задачи статистической проверки гипотезы о соответствии интенсивности отказов наблюдаемой РЭС λ_k среднегрупповому значению интенсивности отказов λ_r [8].

Допустим, что группу образуют N высоконадежных унифицированных РЭС, объединенных по принципу единства технологии изготовления, назначения и условий их эксплуатации. Пусть для k -й РЭС t_k – наработка, $r_k = r(t_k)$ – случайное число отказов за время наблюдения, λ_k – интенсивность отказов. Общая наработка группы РЭС при этом составляет $t_r = \sum_{k=1}^N t_k$, а

общее число отказов – $r_r = \sum_{k=1}^N r_k$. Суммарный поток отказов группы РЭС, как и поток отказов каждой РЭС, полагается пуассоновским. Для пуассоновской величины r_r математическое ожидание составляет $M[r_r] = \lambda_r t_r$, где λ_r – среднегрупповое значение интенсивности отказов.

В то же время $M[r_r] = \sum_{k=1}^N \lambda_k t_k$. Отсюда может быть выражена среднегрупповая интенсив-

ность отказов для N РЭС: $\lambda_r = \frac{1}{t_r} \sum_{k=1}^N \lambda_k t_k = \sum_{k=1}^N \lambda_k q_k$, где $q_k = t_k/t_r$.

Пусть необходимо проверить соответствие интенсивности отказов k -й РЭС λ_k среднегрупповой интенсивности отказов λ_r , причем в общем случае обе эти величины могут быть неизвестны. Для этого формируются гипотезы о соответствии и несоответствии интенсивностей отказов λ_k и λ_r – нулевая гипотеза $H_0: \lambda_k = \lambda_r$ и две единичные гипотезы $H_{11}: \lambda_k > \lambda_r$ и $H_{12}: \lambda_k < \lambda_r$. При подтверждении нулевой гипотезы H_0 можно полагать, что оценка интенсивности отказов k -й РЭС λ_k соответствует среднегрупповой интенсивности отказов λ_r , а при подтверждении конкурирующих гипотез H_{11} и H_{12} можно полагать, что оценка интенсивности отказов k -й РЭС λ_k не соответствует среднегрупповой интенсивности отказов λ_r .

Для пуассоновского потока отказов вероятности случайного числа отказов за время наблюдения для k -й РЭС r_k и общего числа отказов группы РЭС r_r определяются выражениями

$$P(r_k) = \frac{(\lambda_k t_k)^{r_k}}{r_k!} e^{-\lambda_k t_k}, \quad (17)$$

$$P(r_r) = \frac{(\lambda_r t_r)^{r_r}}{r_r!} e^{-\lambda_r t_r}. \quad (18)$$

Построим решающее правило проверки гипотезы $H_0: \lambda_k = \lambda_r$ при наблюдаемом числе отказов k -й РЭС r_k и группы РЭС r_r и соответствующих наработках t_k и t_r . Для этого рассмотрим условное распределение числа отказов k -й РЭС при заданном числе отказов (замен) в группе

$P(r_k | r_r) = \frac{P(r_k, r_r)}{P(r_r)}$. Используя независимость случайных величин r_k и $r_r - r_k$, условное распределение $P(r_k | r_r)$ можно записать в следующем виде:

$$P(r_k | r_r) = \frac{P(r_k, r_r - r_k)}{P(r_r)} = \frac{P(r_k)P(r_r - r_k)}{P(r_r)}. \quad (19)$$

Пуассоновская величина $r_\Gamma - r_k$ при условии справедливости гипотезы H_0 имеет математическое ожидание $M[r_\Gamma - r_k] = \lambda_\Gamma(t_\Gamma - t_k)$, поэтому

$$P(r_\Gamma - r_k) = \frac{[\lambda_\Gamma(t_\Gamma - t_k)]^{r_\Gamma - r_k}}{(r_\Gamma - r_k)!} e^{-\lambda_\Gamma(t_\Gamma - t_k)}. \quad (20)$$

Подставляя выражения (17), (18) и (20) в выражение (19), находим

$$P(r_k | r_\Gamma) = \frac{r_\Gamma!}{r_k!(r_\Gamma - r_k)!} \frac{(\lambda_k t_k)^{r_k} [\lambda_\Gamma(t_\Gamma - t_k)]^{r_\Gamma - r_k}}{(\lambda_\Gamma t_\Gamma)^{r_\Gamma}} e^{-\lambda_k t_k - \lambda_\Gamma(t_\Gamma - t_k) + \lambda_\Gamma t_\Gamma}. \quad (21)$$

Отсюда с учетом справедливости гипотезы $H_0: \lambda_k = \lambda_\Gamma$ имеем

$$P(r_k | r_\Gamma) = C_{r_\Gamma}^{r_k} \left(\frac{t_k}{t_\Gamma} \right)^{r_k} \left(1 - \frac{t_k}{t_\Gamma} \right)^{r_\Gamma - r_k}. \quad (22)$$

Следовательно, условное распределение $P(r_k | r_\Gamma)$ является биномиальным законом распределения с параметром $q_k = t_k/t_\Gamma$.

Тогда при конкурирующей гипотезе $H_{11}: \lambda_k > \lambda_\Gamma$ в качестве решающего правила для принятия гипотезы H_0 служит неравенство

$$\sum_{i=r_k}^{r_\Gamma} C_{r_\Gamma}^{r_k} q_k^i (1 - q_k)^{r_\Gamma - i} \geq \alpha, \quad (23)$$

где α – уровень значимости критерия – малая величина, которая задается в соответствии с общими правилами проверки статистических гипотез [13]. Если же

$$\sum_{i=r_k}^{r_\Gamma} C_{r_\Gamma}^{r_k} q_k^i (1 - q_k)^{r_\Gamma - i} < \alpha. \quad (24)$$

то нулевая гипотеза H_0 при конкурирующей гипотезе H_{11} отвергается.

При конкурирующей гипотезе $H_{12}: \lambda_k < \lambda_\Gamma$ в качестве решающего правила для принятия гипотезы H_0 служит неравенство

$$\sum_{i=0}^{r_k} C_{r_\Gamma}^{r_k} q_k^i (1 - q_k)^{r_\Gamma - i} \geq \alpha. \quad (25)$$

Если же

$$\sum_{i=0}^{r_k} C_{r_\Gamma}^{r_k} q_k^i (1 - q_k)^{r_\Gamma - i} < \alpha. \quad (26)$$

то нулевая гипотеза H_0 при конкурирующей гипотезе H_{11} отвергается. Для биномиального распределения в выражениях (23)–(26) может быть использована нормальная аппроксимация со специально выбранными параметрами [14].

Рассмотренный подход позволяет с достаточной достоверностью определять интенсивность отказов высоконадежных РЭС по цензурированной выборке, полученной для группы однотипных унифицированных РЭС, а также проверить соответствие интенсивности отказов наблюдаемой РЭС среднегрупповой интенсивности отказов. Если при эксплуатации группы унифицированных РЭС зафиксировано определенное количество отказов, то можно статистически оценить параметры закона распределения времени безотказной работы. Накопленный таким образом объем информации о надежности унифицированных РЭС позволяет решить задачу прогнозирования показателей их безотказности для проведения технического обслуживания по состоянию, а установленное соответствие интенсивности отказов наблюдаемой РЭС среднегрупповой интенсивности отказов позволяет распространять выводы о надежности отдельных унифицированных РЭС на все РЭС, входящие в группу.

Список используемых источников

1. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств / В.В. Гольдин, В.Г. Журавский, А.В. Сарафанов и др. – М.: Радио и связь, 2002. – 379 с.
2. Шаламов А.С. Интегрированная логистическая поддержка наукоемкой продукции. – М.: Университетская кн., 2008. – 464 с.
3. Молотов Е.П. Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.
4. Боев С.Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 430 с.
5. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 478 с.
6. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
7. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке. – М.: Высш. шк., 1989. – 432 с.
8. Садыхов Г.С., Савченко В.П., Сидняев Н.И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 382 с.
9. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В.И. Городецкий, А.К. Дмитриев, В.М. Марков и др. – Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
10. Ивченко Б.П., Мартыщенко Л.А., Монастырский М.Л. Теоретические основы информационно-статистического анализа сложных систем. – СПб.: Лань, 1997. – 320 с.
11. Рыбалко В.В. Математические модели контроля надежности объектов энергетики. – СПб.: СПбГТУРП, 2010. – 151 с.
12. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем / Л.Н. Александровская, И.З. Аронов, А.И. Елизаров и др. – М.: Логос, 2001. – 232 с.
13. Соколов Г.А., Гладких И.М. Математическая статистика. – М.: изд-во «Экзамен», 2007. – 431 с.
14. Садыхов Г.С., Кузнецов В.И. Методы и модели оценок безопасности сверхназначенных сроков эксплуатации технических объектов. – М.: ЛКИ, 2007. – 144 с.

К.Г. Зиновьев
1 ГИК МО РФ;
А.А. Сасункевич,
кандидат техн. наук;
С.Б. Силантьев,
кандидат техн. наук, доцент

ОЦЕНИВАНИЕ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ЗОНЕ РАДИОВИДИМОСТИ НАЗЕМНОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА

Представлена разработанная методика определения границ зоны радиовидимости космического аппарата наземным радиотехническим средством. Получено аналитическое выражение для расчета границы зоны радиовидимости в зависимости от места расположения РТС, определен критерий попадания в эту зону и представлены соотношения для расчета параметров полученного выражения. Приведен пример расчета времени нахождения космического аппарата в зоне радиовидимости наземного радиотехнического средства на основе разработанной методики.

Ключевые слова: зона радиовидимости, космический аппарат, радиотехническое средство.

ВВЕДЕНИЕ

Управление орбитальной группировкой космических аппаратов (КА) является ответственной задачей. При организации этого процесса решается целый комплекс задач, к числу которых относится задача определения времени нахождения КА в зоне радиовидимости (ЗРВ) наземного радиотехнического средства (РТС). Количество публикаций, связанных с решением этой задачи, довольно ограничено. Тематика публикаций касается в основном расчетов зон обслуживания для систем спутниковой связи [1–4]. В настоящее время расчеты границ ЗРВ ведется либо приближенными методами, что снижает точность определения времен входа, выхода и, соответственно, нахождения КА в ЗРВ РТС, либо эти расчеты проводятся с использованием сложных математических вычислений, включая численные методы, что снижает оперативность формирования целеуказаний РТС для проведения сеансов связи с КА. Одним из способов решения данной проблемы является получение аналитической зависимости, определяющей границу ЗРВ в зависимости от координат РТС, и формирование критерия, устанавливающего факт нахождения КА в ЗРВ РТС.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ЗОНЫ РАДИОВИДИМОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАЗЕМНЫМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ

Зона радиовидимости КА – часть поверхности Земли, с которой КА виден под углом возвышения антенны, превышающим минимально допустимое значение в определенный момент времени [5]. Минимальное возвышение оси антенны РТС над плоскостью местного горизонта – минимальный угол места (γ_{\min}). На практике минимальный угол места $\gamma_{\min} = 7^\circ$, а зоны радиовидимости для 0° и 7° называются соответственно нулевой и семиградусной. Нулевая ЗРВ – это полусфера, ограниченная плоскостью местного горизонта. ЗРВ можно характеризовать углом раствора кругового конуса φ_3 . В частности, нулевую ЗРВ можно характеризовать углом раствора кругового конуса φ_{30} , начало которого находится в центре Земли

(O_3), а ось проходит через центр Земли и точку стояния РТС (С). Аналогично можно характеризовать семиградусную ЗРВ углом раствора кругового конуса φ_{37} (рис. 1).

На рис. 1 помимо упомянутых использованы следующие обозначения:

$D_{\text{РТС}}$ – дальность действия РТС;

$t_{\text{вх0}}, t_{\text{вых0}}$ – время входа и выхода в нулевую зону соответственно;

$t_{\text{вх7}}, t_{\text{вых7}}$ – время входа и выхода в семиградусную зону соответственно;

R_3 – радиус Земли;

H – высота орбиты КА.

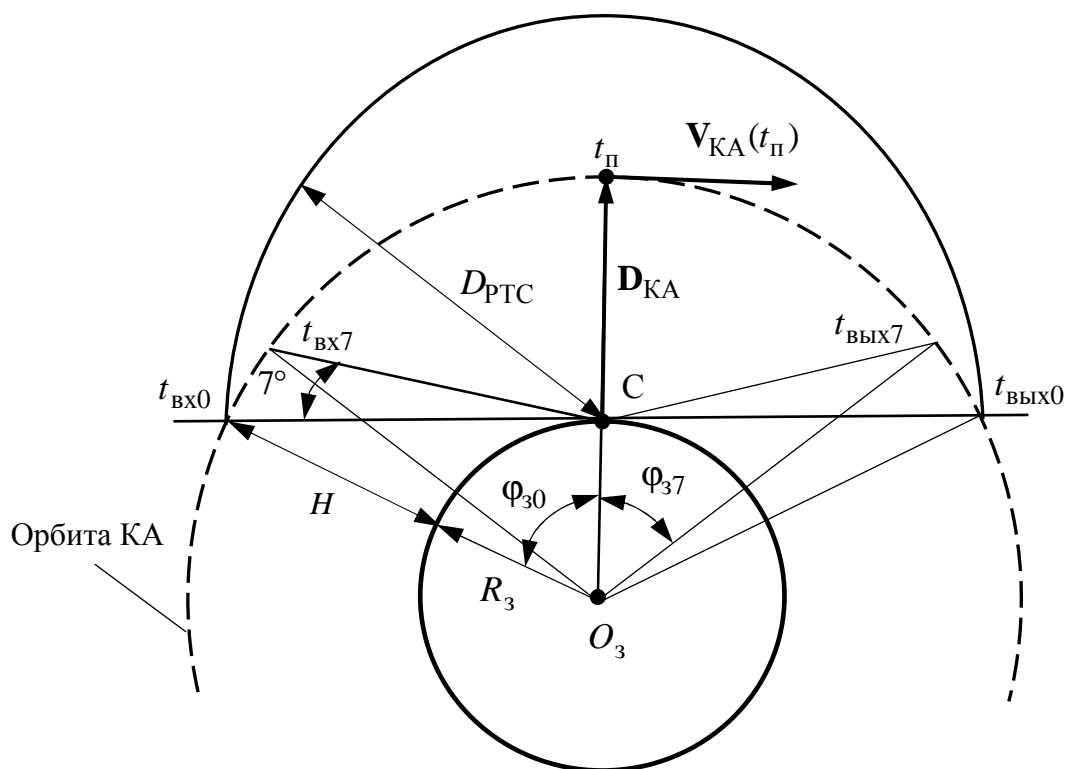


Рис. 1. Нулевая и семиградусная зоны радиовидимости КА

В ЗРВ имеется характерная точка, называемая параметром (траверсом). Время ее прохождения – $t_{\text{п}}$. Параметр – это точка на орбите, когда РТС и КА находятся в плоскости, проходящей через центр Земли перпендикулярно плоскости орбиты. Эта точка характерна тем, что вектор скорости КА $\mathbf{V}_{\text{КА}}(t_{\text{п}})$ перпендикулярен вектору наклонной дальности $\mathbf{D}_{\text{КА}}$, а угол места КА максимален $\gamma(t_{\text{п}}) = \gamma_{\text{max}}$.

Определим, как изменяется зона радиовидимости в зависимости от широты точки расположения РТС ($\varphi_{\text{РТС}}$).

Будем рассматривать земную зону радиовидимости, характеризуемую углом раствора кругового конуса φ_3 . Примем за начальное положение $\varphi_{\text{РТС}} = 90^\circ$. Выберем на границе ЗРВ РТС характерные точки: точка А совпадает с Северным полюсом Земли; точки В, С, D, E

расположены на основании конуса с углом при вершине, равным φ_3 , угловое расстояние между этими точками равно 90° (рис. 2).

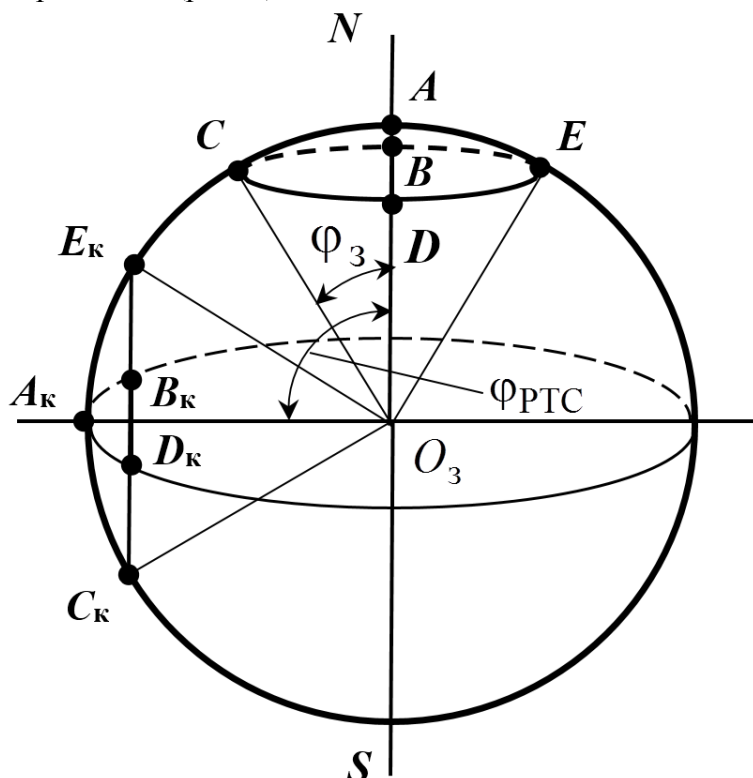


Рис. 2. Характерные точки зоны радиовидимости КА

При изменении месторасположения РТС от начального $\varphi_{PTC} = 90^\circ$ до конечного $\varphi_{PTC} = 0^\circ$ характерные точки переместятся и займут положение A_K, B_K, C_K, D_K, E_K . Точки A_K, B_K, D_K будут лежать в плоскости экватора.

Отообразим изменение ЗРВ РТС в зависимости от φ_{PTC} на «развертке» Земли (рис. 3). Для простоты будем полагать, что $\lambda_{PTC} = 0^\circ$.

При $\varphi_{PTC} = 90^\circ$ ЗРВ РТС будет представлять из себя прямоугольник, одна сторона которого в угловом измерении по долготе равна 2π (точки E' и E''), а другая – в угловом измерении по широте равна φ_3 . При $\varphi_{PTC} = 0^\circ$ ЗРВ РТС будет представлять из себя круг радиусом φ_3 (точки A_K, B_K, C_K, D_K, E_K). При изменении φ_{PTC} от $\varphi_{PTC} = 90^\circ$ до $\varphi_{PTC} = 0^\circ$ прямоугольник должен «преобразоваться» в круг. При этом точки B и D будут перемещаться по окружностям радиусом $(90^\circ - \varphi_3)$ и с центрами в точках $(0^\circ, -90^\circ)$ и $(0^\circ, 90^\circ)$ соответственно, остальные точки будут перемещаться по меридиану, долгота которого определяется долгой месторасположения РТС λ_{PTC} (в нашем случае $\lambda_{PTC} = 0^\circ$). Направления движения соответствующих точек на рис. 2 показаны стрелками.

Для наглядности определения вида и параметров ЗРВ РТС при изменении φ_{PTC} от $\varphi_{PTC} = 90^\circ$ до $\varphi_{PTC} = 0^\circ$ возьмем два промежуточных значения φ_{PTC} (рис. 2):

- $\varphi_{PTC1} = 90^\circ - \varphi_3$ (точки A_1, B_1, C_1, D_1, E_1);
- $\varphi_{PTC2} = 45^\circ$ (точки A_2, B_2, C_2, D_2, E_2).

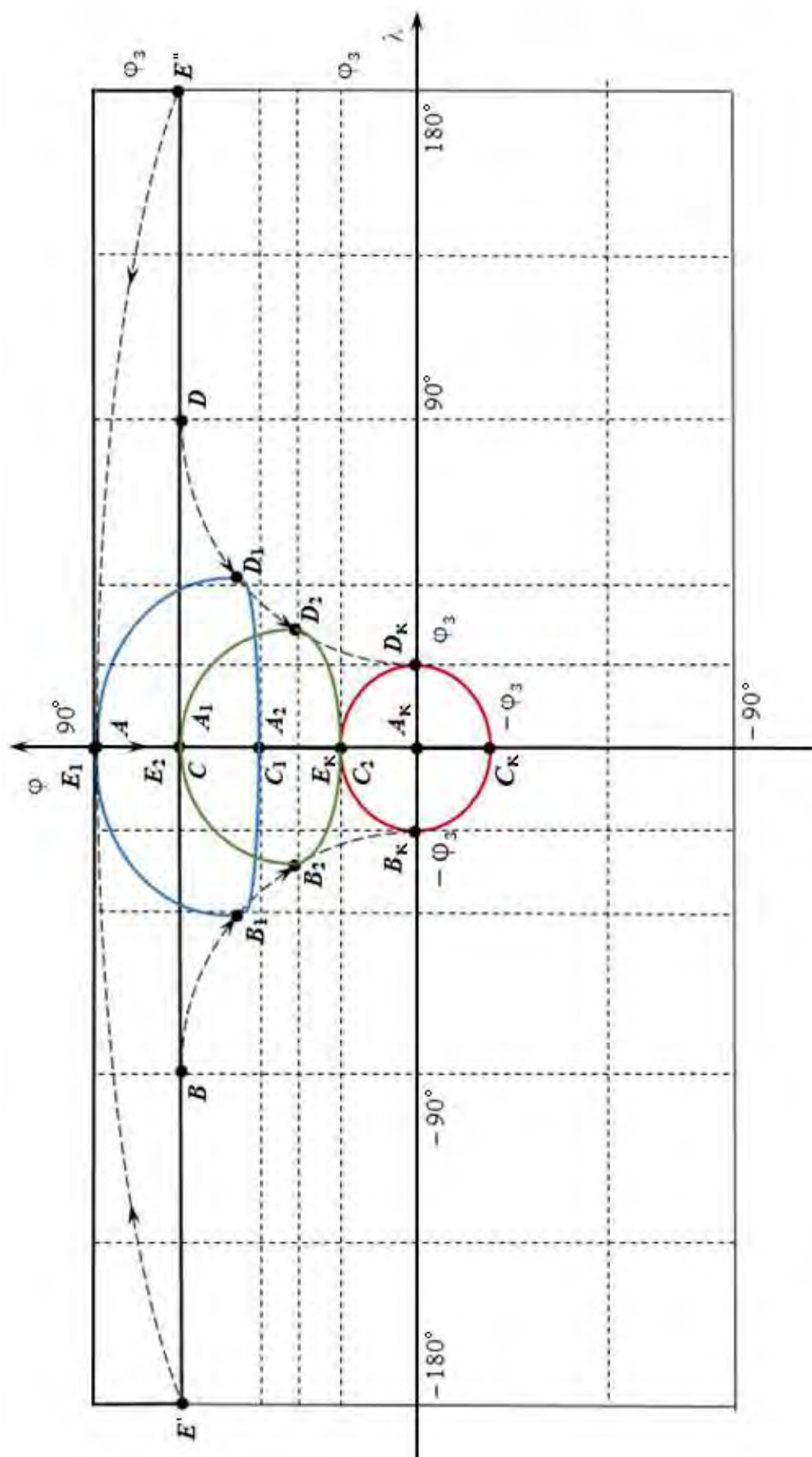


Рис. 3. Изменение ЗРВ в зависимости от широты РТС на «развертке» Земли

Используя рис. 3 и приведенные выше рассуждения об особенностях изменения положений характерных точек ЗРВ РТС, можно определить зависимости изменения координат этих точек от $\varphi_{\text{РТС}}$:

$$\begin{aligned} A &(\lambda_{\text{РТС}}, \varphi_{\text{РТС}}); \\ B &(\lambda_{\text{РТС}} - 90^\circ + (90^\circ - \varphi_3) \cdot \cos \varphi_{\text{РТС}}, (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}}); \\ C &(\lambda_{\text{РТС}}, \varphi_{\text{РТС}} - \varphi_3); \\ D &(\lambda_{\text{РТС}} + 90^\circ - (90^\circ - \varphi_3) \cdot \cos \varphi_{\text{РТС}}, (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}}); \\ E &(\lambda_{\text{РТС}}, \varphi_{\text{РТС}} + \varphi_3) \text{ при } (\varphi_{\text{РТС}} + \varphi_3) \leq 90^\circ. \end{aligned} \quad (1)$$

При $\varphi_{\text{РТС}1} = 90^\circ - \varphi_3$ верхнюю часть ЗРВ ограничивает кривая, проходящая через точки B_1, E_1, D_1 , нижнюю – кривая, проходящая через точки B_1, C_1, D_1 . При $\varphi_{\text{РТС}2} = 45^\circ$ верхнюю часть ЗРВ ограничивает кривая, проходящая через точки B_2, E_2, D_2 , нижнюю – кривая, проходящая через точки B_2, C_2, D_2 . В конечном положении (при $\varphi_{\text{РТС}} = 0^\circ$) верхнюю часть ЗРВ ограничивает кривая, проходящая через точки B_k, E_k, D_k , нижнюю – кривая, проходящая через точки B_k, C_k, D_k .

Так как граница ЗРВ гладкая (не имеет изломов и разрывов), то касательные в точках $B_1, B_2, B_k, D_1, D_2, D_k$ должны быть параллельны оси ординат. Учитывая последнее обстоятельство, а также тот факт, что при $\varphi_{\text{РТС}} = 0^\circ$ граница ЗРВ является окружностью, есть основание полагать, что указанные кривые есть половины эллипсов, соединенные между собой. Уравнение эллипса известно [6], и в нашем случае может быть записано в виде

$$\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{a^2} + \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

где λ_0 и φ_0 – координаты центра эллипса;

a и b – большая и малая полуоси эллипса соответственно.

С учетом выражений для координат характерных точек (1) можно определить параметры эллипса в зависимости от $\varphi_{\text{РТС}}$.

Начальное значение λ_0 определяется $\lambda_{\text{РТС}}$

$$\lambda_0 = \lambda_{\text{РТС}}. \quad (3)$$

Начальное значение φ_0 определяется значением широты характерных точек B и D

$$\varphi_0 = (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}}. \quad (4)$$

Значение a для будет определяться в соответствии с выражением

$$a = \lambda_{\text{РТС}} - \lambda_D = 90^\circ - (90^\circ - \varphi_3) \cdot \cos \varphi_{\text{РТС}}. \quad (5)$$

Значение b для верхней и нижней половин ЗРВ будет разным.

Значение b для верхней половины ЗРВ будет определяться в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} b &= \varphi_E - \varphi_B = \varphi_{\text{РТС}} + \varphi_3 - (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}}, \\ &\text{если } \varphi \geq (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Значение b для нижней половины ЗРВ будет определяться в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} b &= \varphi_B - \varphi_C = (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}} - (\varphi_{\text{РТС}} - \varphi_3) = (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}} - \varphi_{\text{РТС}} + \varphi_3, \\ &\text{если } \varphi < (90^\circ - \varphi_3) \cdot \sin \varphi_{\text{РТС}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Критерий нахождения КА в ЗРВ РТС

$$\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{a^2} + \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{b^2} < 1, \quad (8)$$

Таким образом, определено аналитическое выражение (2) для расчета границы ЗРВ в зависимости от места расположения РТС ($\lambda_{\text{РТС}}, \varphi_{\text{РТС}}$), получены расчетные соотношения (4),

(5), (6), (7) для определения параметров этого выражения и представлен критерий нахождения КА в ЗРВ РТС (8). С учетом сказанного методика определения границ зоны радиовидимости космического аппарата наземным радиотехническим средством может быть представлена в виде выполнения следующих действий.

1. Определить угол раствора кругового конуса φ_3 по известному соотношению [7]

$$\varphi_3 = \arccos \left(\frac{R_3}{R_3 + H} \cos \gamma_{\min} \right) - \gamma_{\min}.$$

2. По формулам (3) и (4) определить значения λ_0 и φ_0 .
3. По формулам (5), (6) и (7) определить значения a и b .
4. В соответствии с выражением (2) определить границы зоны радиовидимости космического аппарата наземным радиотехническим средством.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ЗОНЕ РАДИОВИДИМОСТИ НАЗЕМНОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА

Для примера в качестве КА возьмем КА «Можаяец-4». Ориентировочные параметры его околокруговой орбиты: $H_{кр} = 700$ км; $i = 98^\circ$, $T = 5917$ с. Значения координаты места расположения РТС примем $\lambda_{РТС} = 30^\circ$ с.ш., $\varphi_{РТС} = 60^\circ$ с.ш.

Воспользуемся известными выражениями для вычисления географических координат подспутниковых точек [7]:

$$\varphi_{пт} = \arcsin(\sin(i) \sin(u)), \quad (9)$$

где i – наклонение орбиты;

u – аргумент широты, $u = 360^\circ \cdot t / T$;

t – текущее время полета;

T – период орбиты,

$$\lambda_{пт} = \lambda_{\odot} + \Delta\lambda_{КА} + \Delta\lambda_3(t), \quad (10)$$

где λ_{\odot} – долгота подспутниковой точки на момент прохождения экватора;

$\Delta\lambda_{КА}$ – изменение долготы относительно за счет движения КА, определяемое в соответствии с выражением

$$\Delta\lambda_{КА} = \arcsin \frac{\operatorname{tg} \varphi_{пт}}{\operatorname{tg} i};$$

$\Delta\lambda_3$ – изменение долготы за счет вращения Земли, вызванное смещением долготы гринвичского меридиана относительно абсолютной геоцентрической экваториальной системы координат вследствие вращения Земли

$$\Delta\lambda_3 = -\omega_3(t - t_{\odot}) = -\frac{2\pi}{T_{3в}}(t - t_{\odot}),$$

где T – звездное время, $T_{3в} = 86164$ с;

t_{\odot} – время прохождения экватора.

Вычисляя значения широты ($\varphi_{пт}$) и долготы ($\lambda_{пт}$) подспутниковой точки в соответствии с выражениями (9), (10) и подставляя их в выражение (8), можно определить время входа ($t_{вх}$), время выхода ($t_{вых}$) и, соответственно, время нахождения ($\Delta t = t_{вых} - t_{вх}$) КА в ЗРВ РТС.

Время прохождения экватора примем $t_{\odot} = 0$ с.

На рис. 4 представлены ЗРВ РТС (область, ограниченная прерывистой линией) и трасса полета КА на восходящем участке орбиты (4 сплошные линии).

В рассматриваемом случае межвитковый сдвиг по долготе составит $\Delta\lambda_{мв} = 24.7^\circ$.

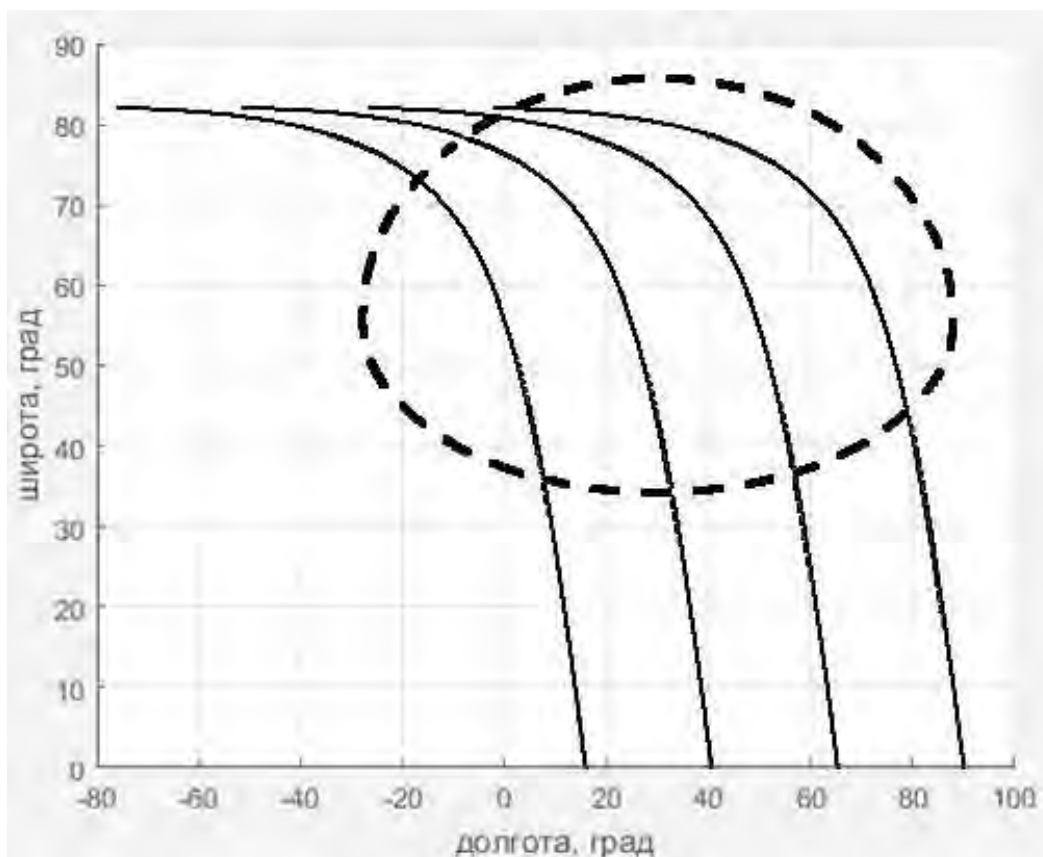


Рис. 4. ЗРВ РТС и трасса полета КА

Таблица 1

Времена входа, выхода и нахождения КА в ЗРВ РТС

	1 виток	2 виток	3 виток	4 виток
$t_{\text{вх}}, \text{с}$	750	620	575	580
$t_{\text{вых}}, \text{с}$	1465	1410	1345	1240
$\Delta t, \text{с}$	715	790	770	660
$\lambda_{\text{пт вх}}, \text{град.}$	78,9	56,6	32,7	7,9
$\varphi_{\text{пт вх}}, \text{град.}$	44,8	37,0	34,3	34,6
$\lambda_{\text{пт вых}}, \text{град.}$	2,3	-1	-8,1	-17,0
$\varphi_{\text{пт вых}}, \text{град.}$	81,9	80,8	78,4	73,2

На рис. 4 видно, что КА на восходящем участке орбиты попадает в ЗРВ РТС на четырех последовательных витках. Времена входа, выхода и нахождения КА в ЗРВ РТС представлены в табл. 1. Для нисходящего участка орбиты картина будет аналогичной.

Результаты, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что на каждом из четырех последовательных витков КА находится в ЗРВ как РТС от 660 с до 790 с (~ 11–13 мин).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное аналитическое выражение для расчета границы зоны радиовидимости в зависимости от места расположения радиотехнического средства и сформированный критерий попадания КА в эту зону позволяют повысить точность определения времен входа, выхода и, соответственно, нахождения КА в ЗРВ РТС при сохранении высокой оперативности.

Список используемых источников

1. *Машибиц Л.М.* Зоны гарантированного и регламентированного уровней сигнала системы спутниковой связи // Радиотехника. – 1977. – № 12. – С. 32–38.
2. *Машибиц Л.М.* Зоны обслуживания систем спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1982. – 169 с.
3. Анализ зон радиовидимости систем спутниковой связи на ИСЗ, размещаемых на орбитах различных типов / А.А. Акимов, А.М. Аносов, Г.С. Гусаков и др. // Электросвязь. – М.: Инфо-Электросвязь. – 1992. – № 1. – С. 18–21.
4. *Акимов А.А.* Особенности размещения наземных станций в системах связи через негеостационарные ИСЗ // Электросвязь. – М.: Инфо-Электросвязь, 1998. – № 2. – С. 21–36.
5. *Цветков К.Ю., Осташов И.Т., Косяков Е.Н.* Радиорелейные и спутниковые системы передачи информации специального назначения: учебник / под общ. ред. К.Ю. Цветкова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 447 с.
6. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., испр. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
7. *Богачёв С.А., Милевич Э.Г.* Расчетно-графические работы по баллистическим дисциплинам: метод. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 42 с.

С.В. Алуев,
кандидат техн. наук;
Д.Л. Каргу;
кандидат техн. наук, доцент;
Н.В. Радионов,
доктор экономических наук, доцент;
Г.Б. Стеганов,
кандидат техн. наук, доцент;
Д.А. Шубин

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ НАЛИЧИИ ЧАСТИЧНОГО ЗАТЕНЕНИЯ

В статье разработан алгоритм построения вольт-амперных характеристик (ВАХ) непланарных многостворчатых солнечных батарей (СБ) космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при наличии частичного затенения створок. Задача решается путем суммирования мощностей множества конструктивных блоков (КБ) СБ, характеризуемых общим значением напряжения параллельно соединяемых в КБ элементарных генераторов (ЭГ). Значение напряжений каждого КБ определяется по текущей суммарной ВАХ соединяемых ЭГ с частичными и полными затенениями. Обоснован выбор типа модели фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). С учетом анализа геометрии СБ в целом и ее конструктивных блоков рассмотрен вариант построения системы генерирования мощности с общим и поблочным экстремальным регулированием мощности (ЭРМ) СБ.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, фотоэлектрические преобразователи, комплекс автоматизации и стабилизации, экстремальный регулятор мощности, бортовая система электроснабжения.

ВВЕДЕНИЕ

Применяемые в настоящее время конструктивно-компоновочные схемы КА ДЗЗ (рис.1) не исключают частичных и полных длительных затенений отдельных конструктивных блоков панелей и створок солнечных батарей на освещенном участке орбиты (ОУО). В вариантах компоновочных схем, показанных на рис. 1, б, в, панели СБ в орбитальном полете жестко закреплены (не поворачиваются) относительно корпуса КА. Каждая панель может содержать несколько створок. В варианте, соответствующем рис. 1, а, применяются как панели с одноосной ориентацией относительно корпуса, так и жестко закрепленные панели, которые не затеняются конструктивными элементами КА. Однако на таких КА при необходимости часть КБ СБ может располагаться на корпусе КА (или на термостатированном каркасе) и подвергаться частичным затенениям на ОУО. В этих условиях моделирование изменений текущей мощности СБ в полете является достаточно сложной задачей.

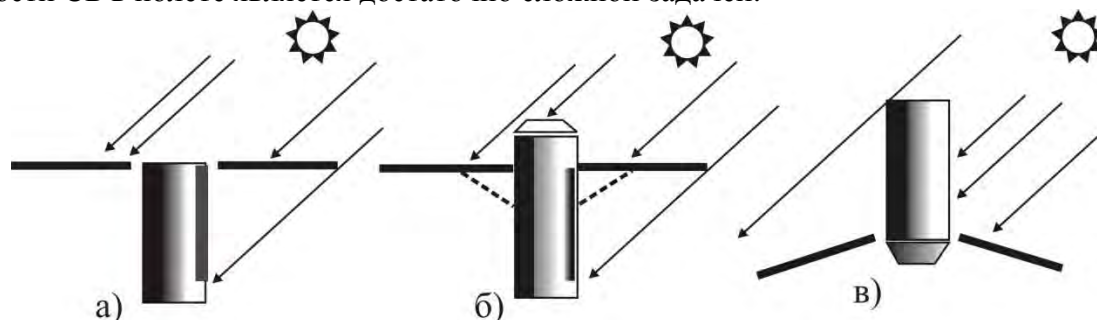


Рис. 1. Типовые конструктивно-компоновочные схемы КА ДЗЗ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОВСТВОРЧАТОЙ СБ

Для решения задачи определения текущей располагаемой мощности многостворчатой солнечной батареи с учетом анализа геометрии СБ в целом и ее конструктивных блоков следует рассмотреть два базовых варианта построения системы генерирования мощности:

- структуру с общим экстремальным регулятором мощности СБ на основе зарядного устройства (ЗУ) и стабилизатора напряжения (СН), входящих в состав комплекса автоматики и стабилизации (КАС), содержащую единственную точку суммирования мощностей КБ СБ (например, створок) на входе ЭРМ – ЗУ (рис. 2);
- множество структур с увеличенным числом точек суммирования мощностей КБ СБ (створок или элементарных генераторов ЭГ) и соответственно с увеличенным числом ЭРМ (рис. 3).

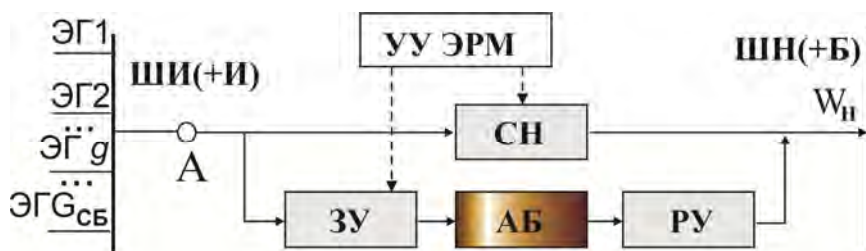


Рис. 2. Структура с общим ЭРМ всех КБ СБ

При общем ЭРМ суммирование мощностей ЭГ створок осуществляется в точке А при одном для всех ЭГ (и створок) напряжении, соответствующем точке максимальной мощности всей многостворчатой СБ в текущих условиях освещенности и температуры.

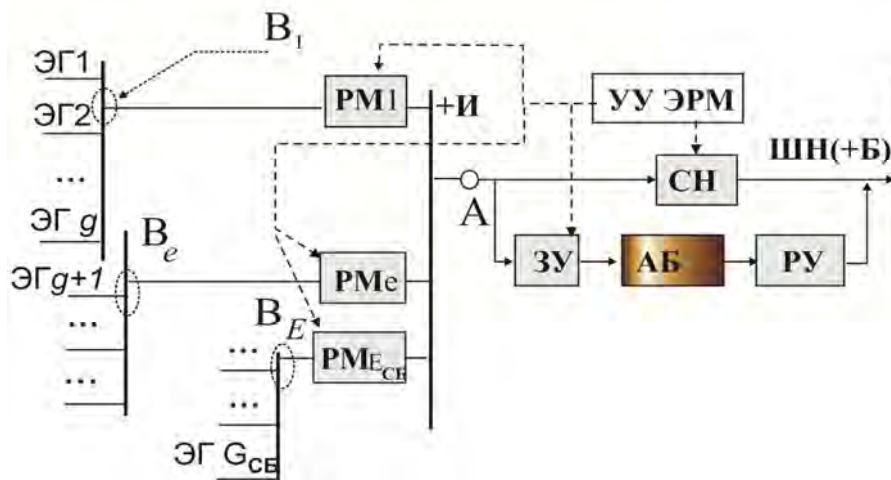


Рис. 3. Структура с увеличенным числом ЭРМ КБ СБ

При увеличенном числе B_e ($e = 1, E_{сб}$) точек суммирования мощностей КБ (панелей, створок, ЭГ) соответственно возрастает и число ЭРМ (РМ). Суммирование мощностей множества ЭГ осуществляется по группам – конструктивным блокам, характеризуемым общим значением напряжения параллельно соединяемых ЭГ. Значение этих напряжений для точки максимальной мощности каждого КБ подлежит определению по текущей суммарной ВАХ соединяемых ЭГ. Поэтому задачами исследования являются нахождение ВАХ каждого из КБ (например, створок), нахождение точек максимальной мощности на каждой ВАХ КБ и всей СБ с учетом различий в ВАХ отдельных створок при их частичном или полном затенении, а также различий в текущих температурах их КБ. Для построения ВАХ каждого КБ, т. е. нескольких ЭГ с частичными и полными затенениями, непосредственно соединенных в параллельную схему, необходимо правильно выбрать модель ФЭП.

Сформулируем следующие требования к математическим моделям ФЭП и СБ для анализа выходной мощности при частичном затенении панелей:

1. Воспроизведение ВАХ ФЭП и СБ с требуемой точностью в рабочих диапазонах изменения температуры панелей, их освещенности и воздействия радиационных факторов.
2. Адекватный учет особенностей процессов генерирования носителей заряда, характерных для современных гетероструктурных СБ.
3. Для анализа состояния и работы защитных устройств сохранение работоспособности модели ФЭП в трех квадрантах системы координат ВАХ ФЭП: в первом – рабочем ($U > 0$, $I > 0$), во втором ($I > 0$, $U < 0$) и четвертом ($I < 0$, $U > 0$).
4. Обеспечение возможности учета сложных электрических схем соединения ФЭП в СБ при последовательном и параллельном соединении сборочных единиц на любом конструктивном уровне – СБ, панель, створка, элементарный генератор.
5. Возможность учета влияния на выходную мощность параметров соединителей и защитных устройств СБ – блокирующих и шунтирующих диодов, а также развязывающих устройств.
6. Возможность моделирования СБ с достаточно большим количеством ФЭП, для каждого из которых при необходимости могут быть заданы индивидуальные условия освещенности, температуры и радиационного повреждения.
7. Обеспечение достаточно простой взаимосвязи элементов принципиальной электрической схемы с пространственной электромонтажной схемой створки, панели.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФЭП И СБ

Перечислим наиболее известные типы математических моделей ФЭП и СБ, используемые разработчиками космической техники:

1. Уравнение смещенной диодной ВАХ

$$I = I_{\Phi} - I_{\text{O}}(e^{C_i T^{-1}(U+rI)} - 1) - \frac{U + rI}{R_{\text{ш}}},$$

где I_{O} – обратный ток насыщения p – n -перехода;

$R_{\text{ш}}$ – шунтирующее сопротивление;

C_i – коэффициенты моделей, определяемые по характеристическим точкам ВАХ ($U_{\text{м}}, I_{\text{м}}, U_{\text{х.х}}, I_{\text{к.3}}$). Здесь $U_{\text{х.х}}$ – напряжение холостого хода.

2. Уравнение смещенной двухдиодной ВАХ

$$I = I_{\Phi} - I_{\text{O1}}(e^{C_1 T^{-1}(U+rI)} - 1) - I_{\text{O2}}(e^{C_2 T^{-1}(U+rI)} - 1) - \frac{U + rI}{R_{\text{ш}}}.$$

3. Уравнение ВАХ как функции тока короткого замыкания

$$I = I_{\text{к.3}}[1 - C_3(e^{(U+rI)/(C_4 U_{\text{х.х}})} - 1)].$$

4. Уравнение с логарифмической функцией тока короткого замыкания

$$I = I_{\text{к.3}} \left[1 - \frac{I_{\text{O}}}{I_{\text{к.3}}} e^{(U+rI)/U_{\text{х.х}} \cdot \text{Ln}\left(\frac{I_{\text{к.3}}}{I_{\text{O}}}\right)} \right].$$

5. Уравнение с логарифмическими зависимостями координат экстремальной точки

$$I = I_{\text{к.3}}[1 - e^{F(U)}].$$

Здесь

$$F(U) = \left\{ \left[\frac{i}{1-i} - \frac{\ln(1-i)}{\ln j} \right] \left(\frac{U}{jU_{x.x}} - 1 \right) + \ln(1-i) \right\} \frac{\ln(U/U_{x.x})}{\ln j}.$$

где

$$j = \frac{U_M}{U_{x.x}}, i = \frac{I_M}{I_{к.з}}.$$

Результаты сравнения приведенных выше математических моделей ФЭП с учетом выдвинутых выше требований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа моделей № 1–5

Свойство	Номер модели				
	1	2	3	4	5
Точность воспроизведения ВАХ в рабочих диапазонах влияющих факторов	+	+	+	–	+
Адекватный учет особенностей гетероструктурных солнечных батарей	+	+	–	+	–
Сохранение работоспособности ФЭП в трех квадрантах ВАХ ФЭП в рабочем диапазоне влияющих факторов	+	+	–	–	–
Возможность учета в модели параметров соединителей и защитных устройств СБ – блокирующих и шунтирующих диодов	+	+	–	–	–
Пригодность для моделирования СБ с большим количеством конструктивных блоков разного уровня, с индивидуальными условиями освещенности, температуры и радиационного повреждения	+	–	–	–	–

Результаты сравнения позволяют выбрать в качестве основы для построения математической модели СБ с частичными затенениями ФЭП модель № 1. Приведем полную совокупность ее основных соотношений, использованных при решении поставленной задачи.

1. Уравнение ВАХ ФЭП при условии $R_{ш} \rightarrow \infty$:

При $U > 0$ (режим генерирования)

$$I = I_{\phi} - I_0 (e^{\beta(U+rI)} - 1).$$

Здесь r – последовательное сопротивление внутренней цепи ФЭП;

β – величина, обратная тепловому потенциалу,

$$\beta = \left(\frac{qU}{AkT} \right)^{-1} = \frac{1}{V_t},$$

где V_t – тепловой потенциал ФЭП;

q – заряд электрона;

A – параметр ВАХ;

T – температура;

k – постоянная Больцмана.

При $U \leq 0$ (режим байпаса)

$$I(U) = I_{д.ш}(U), \quad U_{д.ш}(I) = V_{т.д.ш} \ln\left(\frac{I}{I_{0д.ш}} + 1\right) + r_{д.ш} I = -U,$$

где д.ш – диод шунтируемый.

2. Мощность выходной электрической цепи ФЭП $P = UI$.

3. Параметры уравнения базовой ВАХ, определяемые по данным завода-изготовителя при фиксированных температуре и освещенности:

$$\beta = \frac{\frac{I_M}{I_{K.3} - I_M} + \ln\left(1 - \frac{I_M}{I_{K.3}}\right)}{2U_M - U_{X.X}},$$

$$r = \frac{U_M}{I_M} - \frac{1}{\beta(I_{K.3} - I_M)},$$

$$I_0 = \frac{I_{K.3}}{e^{\beta U_{X.X}} - 1}.$$

4. Зависимость электрических параметров ФЭП от освещенности и температуры при отклонении от базовых условий ($P_{CB\Delta 3} = P_{\Delta 3}, T_{CB\Delta 3} = T_{\Delta 3}$):

$$I_{K.3}(P_{CB}, T) = I_{K.3\Delta 3}(1 + P_{CB} / P_{\Delta 3}) + K_{TI}(T - T_{\Delta 3}),$$

$$I_m(P_{CB}, T) = I_{m\Delta 3}(1 + P_{CB} / P_{\Delta 3}) + K_{TIm}(T - T_{\Delta 3}),$$

$$U_m(P_{CB}, T) = U_{m\Delta 3} + V_{tx} \ln\left(\frac{P_{CB}}{P_{\Delta 3}}\right) + K_{TUm}(T - T_{\Delta 3}),$$

где $K_{TI}, K_{TIm}, V_{tx}, K_{TUm}, K_{TUXX}$ – тепловые коэффициенты приведения ВАХ (константы) по данным завода-изготовителя.

Приведем параметры элементарных генераторов ЭГ створки:

1. Ток короткого замыкания ЭГ

$$I_{K.3g} = I_{K.3gi \min}.$$

2. Напряжение ЭГ, содержащего n_s ФЭП

$$U_{\Delta g}(I) = \sum_{i=1}^{n_s} U_{\Delta gi}(I), I \in [0, I_{K.3g}].$$

3. Напряжение холостого хода ЭГ

$$U_{X.Xg} = U_{\Delta g}(0).$$

Приведем параметры створки:

1. Ток створки, содержащей G ЭГ,

$$I_{CTB}(U) = \sum_{g=1}^{G} I_{\Delta g}(U).$$

2. Мощность на выходе k -й створки ($k = 1, \dots, \tilde{K}$)

$$P_{CTB} = UI_{CTB}(U).$$

3. Напряжение на шинах СЭС у входа в ЭРМ КАС (работа одной створки)

$$U_{СЭС} = U_{CTB}(I_{CTB}) - I_{CTB}R_{ПРОВ} - I_{CTB}R_{Б.Д},$$

где $R_{Б.Д}$ – эквивалентное сопротивление параллельно включенных открытых блокирующих диодов.

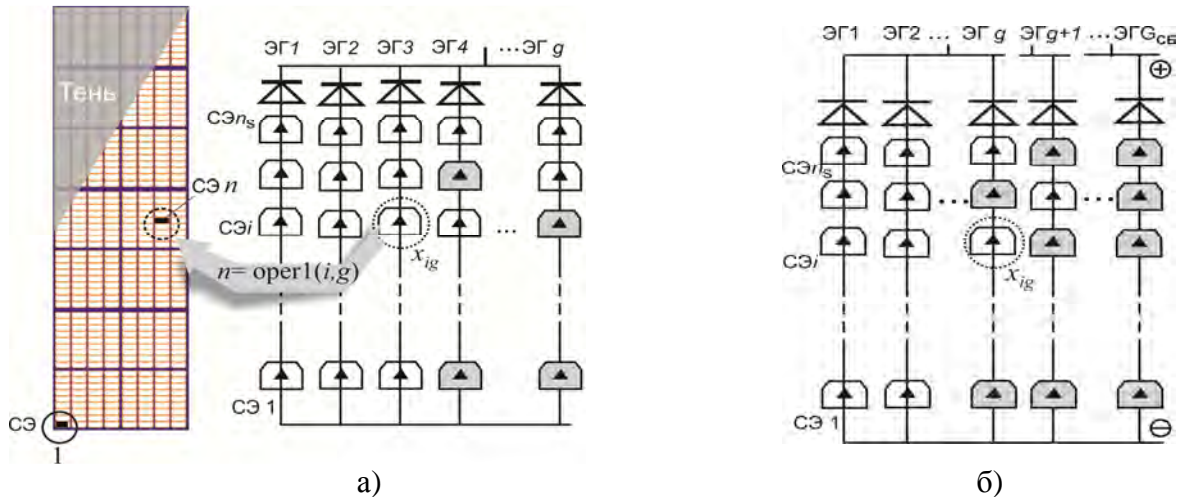


Рис. 4. Схема коммутации ФЭП в ЭГ и ЭГ в КБ (а), а также КБ в СБ (б)

На основе модели №1 с привлечением системы моделей освещенности, затенения и нагрева ФЭП СБ [1], а также типовой схемы коммутации ФЭП (рис. 4) были разработаны математическая модель непланарной многостворчатой СБ и методика расчета выходной мощности системы генерирования электроэнергии КА ДЗЗ в произвольный момент времени при наличии затенений отдельных ФЭП (рис. 5).

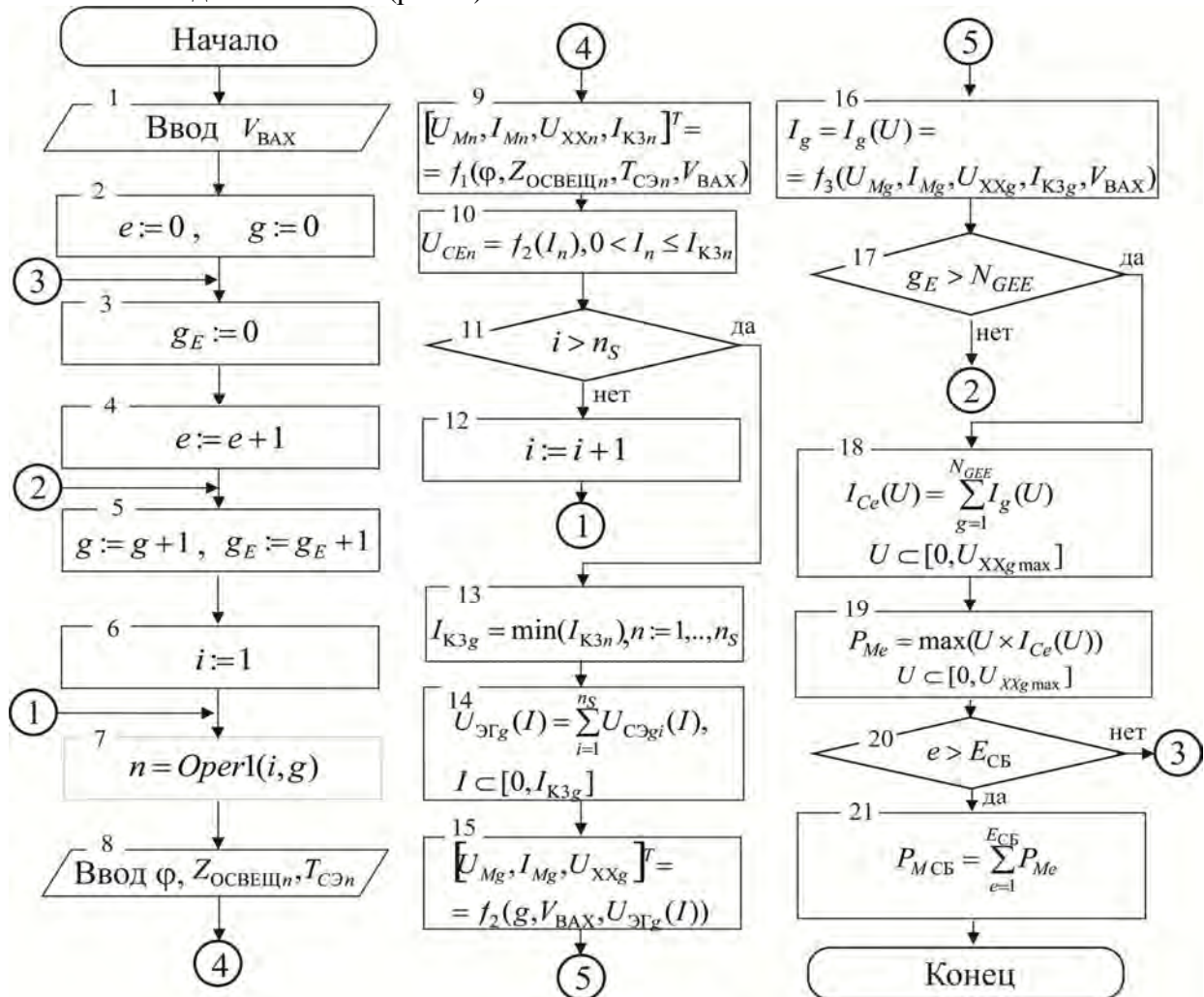


Рис. 5. Алгоритм и методика расчета выходной мощности системы генерирования электроэнергии

Введем следующие обозначения:

V_{BAH} – вектор параметров-констант ФЭП, створки и СБ для решаемой задачи;

e – номер ЭРМ из множества $M_{\text{ЭРМСБ}} = \overline{1, \dots, E_{\text{СБ}}}$;

g – номер ЭГ в СБ из множества $M_{\text{Г СБ ЭГ}} = \overline{1, \dots, G_{\text{СБ}}}$;

g_e – номер ЭГ, подключенного к одному из ЭРМ, $g_e \in M_{\text{Г EE}}$, где $M_{\text{Г EE}} = \overline{1, \dots, N_{\text{Г EE}}}$;

$I_{\text{Ce}}(U)$ – суммарный ток (по ВАХ) всех ЭГ на входе одного ЭРМ с номером e ;

n – оператор, ставящий в соответствие с позицией (i, g) каждого ФЭП в электрической схеме СБ его порядковый номер n и геометрическое (монтажное) положение на одной из створок или всей СБ (идентификация ФЭП) $n = \text{oper } 1(i, g)$;

$N_{\text{Г EE}}$ – число ЭГ на входе одного ЭРМ,

i – номер ФЭП в цепи ЭГ, $i = \overline{1, \dots, n_{\text{Г}}}$.

Рассмотрим методику и алгоритм вычисления максимальной мощности на входе ЭРМ в рассматриваемый момент времени с учетом затенений произвольного числа ФЭП.

После ввода в блоке 1 компонент вектора V_{BAH} осуществляется инициализация вспомогательных переменных (блоки 2–6). Это позволяет выбрать текущий элемент электрической схемы (строка i , столбец g) СБ и в блоке 7 применить к нему оператор $n = \text{oper } 1(i, g)$.

Последнее позволяет в блоке 8 ввести параметры $Z_{\text{освещ}n}, T_{\text{СЭ}n}$ для ФЭП с номером n . По этим данным в блоке 9 с учетом освещенности и температуры в рассматриваемом интервале времени для каждого n -го ФЭП вычисляются координаты характеристических точек его ВАХ:

$$[U_{Mn}, I_{Mn}, U_{\text{X.X}n}, I_{\text{K.3}n}]^T = f_1(n, Z_{\text{освещ}n}, T_{\text{СЭ}n}, V_{\text{BAH}}).$$

Тем самым для $n = \overline{1, \dots, n_{\text{Г}}}$ в блоках 7–12 циклически определяются напряжения и ВАХ всех ФЭП в составе ЭГ: $U_{\text{CE}n} = f_2(I_n), 0 < I_n \leq I_{\text{K.3}n}$. Это позволяет в блоках 13–16 определить соответственно параметры ВАХ ЭГ и координаты характеристических точек ВАХ:

$$I_{\text{K.3}g} = \min(I_{\text{K.3}n}), \quad n = \overline{1, \dots, n_{\text{Г}}},$$

$$U_{\text{ЭГ}g}(I) = \sum_{i=1}^{n_{\text{Г}}} U_{\text{СЭ}gi}(I), \quad I \in [0, I_{\text{K.3}g}].$$

$$[U_{Mg}, I_{Mg}, U_{\text{X.X}g}]^T = f_2(g, V_{\text{BAH}}, U_{\text{ЭГ}g}(I)).$$

Затем вычисляется ток ЭГ по его ВАХ:

$$I_g = I_g(U) = f_3(U_{Mg}, I_{Mg}, U_{\text{X.X}g}, I_{\text{K.3}g}, V_{\text{BAH}}).$$

Данные действия повторяются для всех ЭГ, для которых $g \leq N_{\text{Г EE}}$. Затем формируется путем суммирования уравнение ВАХ параллельного соединения всех ЭГ на входе одного из ЭРМ

$$I_{\text{Ce}}(U) = \sum_{g=1}^{N_{\text{Г EE}}} I_g(U), \quad U \in [0, U_{\text{X.X}g \max}],$$

и по нему вычисляется максимальная мощность на входе ЭРМ.

При этом в отличие от рассмотренного ранее метода для ЭГ точка максимальной мощности на входе данного ЭРМ в общем случае определяется только численным методом – направленным или ненаправленным перебором в диапазоне $U \in [0, U_{\text{X.X}C \max}]$:

$$P_{\text{Me}} = \max(U \times I_{\text{Ce}}(U)), \quad U \in [0, U_{\text{X.X}g \max}].$$

Указанные действия повторяются для всех ЭРМ, т. е. для $e \leq E_{\text{СБ}}$.

В заключение определяется искомая суммарная максимальная мощность на выходах всех ЭРМ СБ (см. точку А на рис. 3) по соотношению

$$P_{\text{МСБ}} = \sum_{e=1}^{E_{\text{СБ}}} P_{Me}.$$

Пример применения разработанной методики к объекту исследований показан на рис. 6.

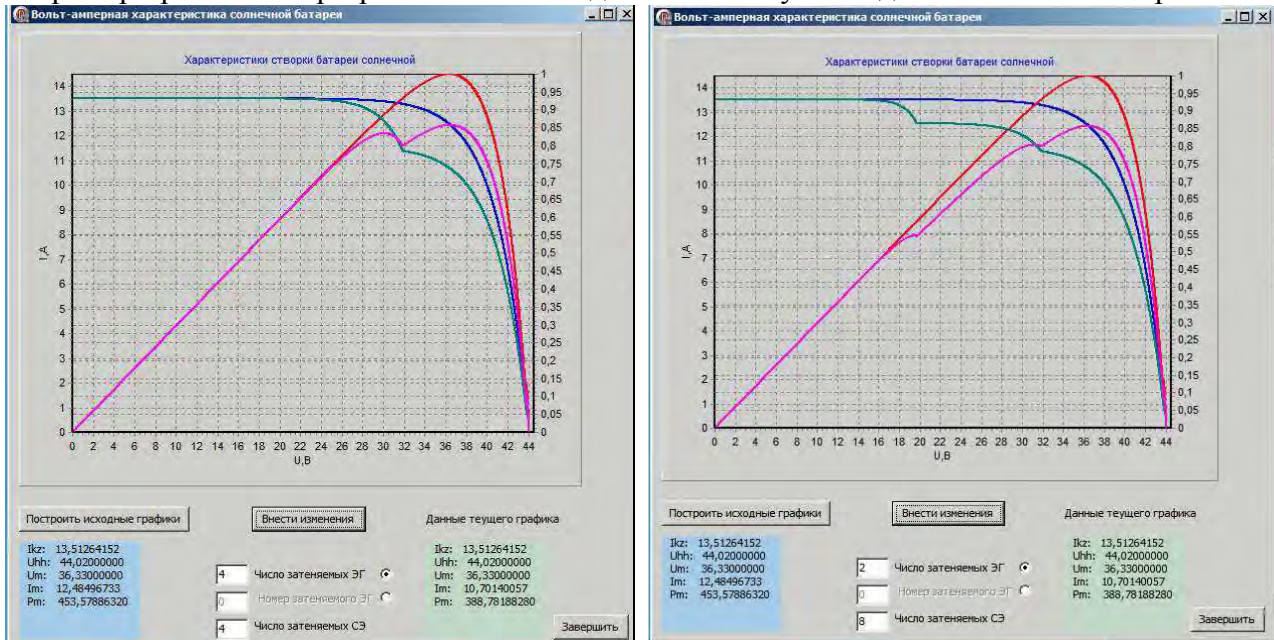


Рис. 6. Применение разработанной методики для получения текущей ВАХ створки при затенении части ФЭП в нескольких ЭГ: в четырех(а) и двух(б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты численного моделирования показывают, что частичные затенения отдельных ФЭП превращают форму ВАХ всех КБ СБ, расположенных иерархически выше ЭГ, из экспоненциальной в кусочно-экспоненциальную, для которой не выполняются известные соотношения по определению координат точки максимальной мощности и аналитическому описанию всей ВАХ. Получаемые при этом вольт-ваттные характеристики большей частью являются многоэкстремальными, что затрудняет устойчивую работу общего ЭРМ и делает целесообразным применение структуры системы генерирования с несколькими ЭРМ.

Список используемых источников

1. Математическое моделирование динамики температуры солнечных батарей в различных условиях орбитального полета КА / Н.Н. Астахов, Д.Л. Каргу, В.И. Горбулин, Д.А. Шубин, Г.Б. Стеганов // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 4–21.
2. Модель энергопритока от солнечных батарей БСЭС КА, стабилизированного вращением / Ю.А. Чудновский, Д.Л. Каргу, Н.В. Радионов, Г.Б. Стеганов, Д.А. Шубин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659.
3. Токовый стабилизатор напряжения солнечной батареи для систем электропитания космических аппаратов / Ю.М. Казанцев и др. // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во НТЛ, 2011. – С. 42–48.

В.Ю. Алексашов,
кандидат техн. наук;
Г.М. Завьялова,
кандидат техн. наук, доцент;
Е.Л. Лебедев,
доктор техн. наук, профессор

ДЕТЕРМИНАНТЫ ВЫБОРА ИННОВАЦИОННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Одним из основных путей перехода к новым образовательным концепциям является процесс обучения на базе компьютерных технологий. В статье обобщён опыт применения подобного обучения в ВКА имени А.Ф. Можайского на кафедре «Контроль качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники» с конца 80-х годов XX столетия. Проведен анализ возможностей современных программных продуктов для обучения. Обобщены результаты апробации программного комплекса Sunrav для создания электронных учебных пособий и электронного тестирования, полученные в рамках НИР «Электрон-2016».

Ключевые слова: обучающие системы на основе компьютерных технологий, электронная книга, электронный учебник, Sunrav BookOffice, BookEditor, Sunrav TestOfficePro, tMaker, электронное тестирование и обучение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нашей стране идет интенсивный процесс переоснащения Вооруженных сил новой современной техникой и дальнейшее их развитие. В этих условиях вопросы совершенствования системы военного образования в военных высших учебных заведениях приобретают особую остроту, поэтому рассмотрение детерминант (от лат. *Determinans* – определяющий) выбора инновационных программных комплексов для разработки электронных образовательных средств является весьма актуальным.

Проблема подготовки офицерских кадров, обладающих высоким военно-профессиональным потенциалом, требует от педагогических коллективов высшей школы совершенствования образовательного процесса. Вследствие этого сейчас в высшей военной школе происходит поиск путей перехода к новым образовательным концепциям, подразумевающим повышение компетенций, эрудиции и творческих начал военных специалистов. Одним из них является информатизация образовательного процесса на базе компьютерных технологий. Первоначально электронно-вычислительную технику (ЭВТ) в учебном процессе использовали при решении учебных и научных задач как средство для выполнения сложных инженерных и исследовательских расчетов.

Но в последнее десятилетие XX века в нашей стране возникло новое направление в образовательной сфере – применение ЭВТ для автоматизации обучения, что явилось значительным прорывом в этой области. В то время уже создавались и внедрялись в учебный процесс автоматизированные курсы, разработка которых требовала от преподавателя специальных знаний [1, 2].

В настоящее время активное внедрение информационных технологий в образовательный процесс осуществляется с применением новых технических и программных средств. Разработано и внедрено большое количество новых программных продуктов, не требующих знания языков программирования как от преподавателей при разработке электронных учебников и тестов, так и от обучающихся в процессе обучения.

В связи с вышесказанным необходимо с учетом опыта прошлых разработок оценить возможности современных программных продуктов для автоматизации обучения и требования по их совершенствованию.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ И ОПЫТ ИХ ВНЕДРЕНИЯ

Автоматизация обучения начиналась с разработки электромеханических тренажеров, позволяющих реализовать диалоговый режим. С развитием электронно-вычислительных машин (ЭВМ) активно стали внедряться специализированные программные пакеты, однако их разработка требовала глубокого знания языков программирования.

Более широкое распространение автоматического обучения стало возможным благодаря разработке и созданию высокоэффективных автоматизированных обучающих систем (АОС), функционирующих на любой модели ЭВМ. Наиболее широкое применение нашли системы АОС «Оскар», «Ирис», «Сократ» и др. Все эти системы являлись пакетами прикладных программ и представляли собой диалоговые системы, ориентированные на создание и поддержание обучающей среды. Любая из них предназначалась для обучения, контроля знаний и приобретения практических навыков работы на терминалах ЭВМ.

Автоматизированные обучающие системы – это многоцелевые системы широкого профиля, позволяющие преподавателю разработать программу автоматизированного курса (ПАК), с помощью которого достигается цель обучения. Программа разрабатывалась по сценарию обучения и контроля знаний, которая далее реализовывалась в виде алгоритма с использованием специального языка – языка описания курсов (ЯОК).

Большим преимуществом АОС явилось наличие возможностей для обучающихся использования этих систем без знания языков программирования, что позволяло обеспечить принцип использования ЭВМ с первого года обучения. Но, как и любой совершенный инструмент, он требовал от преподавателя, его использующего, высокого уровня квалификации. Интегральным итогом этой деятельности являлся разрабатываемый преподавателем ПАК с использованием ЯОК.

Использование АОС в учебном процессе имело следующие достоинства:

- с точки зрения преподавателя: повышение производительности педагогического труда (достижение более высокого уровня усвоения учебного материала); приближение содержания учебно-методической работы к уровню научно-исследовательской; возможность тиражирования передовых методов обучения;
- с точки зрения обучающегося: проявление индивидуальных особенностей и способностей по восприятию учебного материала; снятие «психологических» барьеров общения с преподавателем; обращение за помощью; усиление внимания; «объективность» оценки.

В конце 80-х годов XX столетия в академии им. А.Ф. Можайского на кафедре «Производство и ремонт космических средств» (ныне кафедра «Контроль качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники») был уже накоплен определенный опыт (в течение более 10 лет) использования программно-технических средств АОС на базе системы «Сократ» и ЕС ЭВМ-1045 [2,3]. Этот опыт был приобретен при изучении одной из тем дисциплины «Материаловедение» на практическом занятии в дисплейном классе научно-исследовательского отдела академии, что показало значительное повышение эффективности усвоения изучаемого материала.

Несмотря на все преимущества обучения с использованием АОС, идеи их применения не овладели широкими массами профессорско-преподавательского состава из-за чрезвычайно высокой трудоемкости разработки ПАК.

В дальнейшем интерес к АОС вообще был утерян, и на это имелись объективные причины. Эти системы были разработаны применительно к большим ЕС ЭВМ, которые морально устарели и часто выходили из рабочего состояния. Занятия по всем дисциплинам проводились только в общем специализированном дисплейном классе, что существенно ограничивало доступность АОС.

Кроме того, алгоритмы реализовывались с использованием специального языка (ЯОК), который для преподавателей был достаточно сложным и требовал специальной подготовки.

Но наука не стоит на месте, к концу XX столетия в сфере компьютерной техники и компьютерных технологий произошел качественный скачок. От громоздких стационарных ЭВМ, требующих больших помещений и большого количества обслуживающего персонала, перешли к использованию уже созданных к тому времени персональных ЭВМ и портативных компьютеров (ноутбуков). Произошел колоссальный прогресс в разработке новых программных продуктов, не требующих создания сложных обучающих алгоритмов на языке ЯОК, что дало существенные преимущества: значительно снизились временные и экономические затраты на создание обучающих курсов. Это привело к значительному росту интереса к внедрению автоматизированного обучения в образовательный процесс.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

К настоящему времени уже разработано и внедрено в учебный процесс большое количество новых программных продуктов, позволяющих проводить обучение без знания языков программирования с помощью электронных учебников и электронного тестирования, определяющих качество усвоения материала [4, 5]. При этом выделяются два основных направления:

- организация самостоятельного или под руководством преподавателя изучения теоретической части дисциплины;
- организация самостоятельного независимого контроля знаний в форме электронного тестирования.

Кроме того, широкое распространение получили специализированные программные продукты для обеспечения практических и лабораторных занятий. Широкое применение в данном случае электронных учебных изданий позволяет регулярно и своевременно обновлять учебный материал, а также оперативно корректировать методику и форму подачи материалов.

Применение электронных средств обучения позволяет учитывать индивидуальные особенности обучающегося. Форма и способы подачи учебного материала могут изменяться в широких пределах и настраиваться индивидуально под конкретного пользователя.

Апробация программного комплекса Sunrav. В настоящее время в академии имени А.Ф. Можайского на кафедре «Контроль качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники» осуществлено апробирование внедрения в учебный процесс программного комплекса Sunrav, позволяющего осуществлять интерактивное обучение, для изучения отдельных тем дисциплин: «Метрология, стандартизация и сертификация», «Материаловедение».

Программный комплекс Sunrav включает в свой состав два основных программных пакета: Sunrav BookOffice – для создания электронных учебных изданий и Sunrav TestOfficePro – для создания электронных тестов [5, 6].

В состав Sunrav BookOffice входят:

- BookEditor – программа для создания и редактирования электронной книги;
- BookReader – программа для чтения электронных книг.

В состав Sunrav TestOfficePro входят:

- tMaker – программа для создания тестов;
- tTester – программа для проведения тестирования и tAdmin – программа для управления пользователями и обработки результатов компьютерного тестирования.

Возможности программного комплекса Sunrav опробованы на примере разработки теоретической части электронного учебного пособия по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» по программе BookEditor из состава программного пакета Sunrav

BookOffice на базе учебных материалов, разработанных в Microsoft Word [5, 6]. На рис.1 представлен пример редактирования электронного учебного пособия по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация».

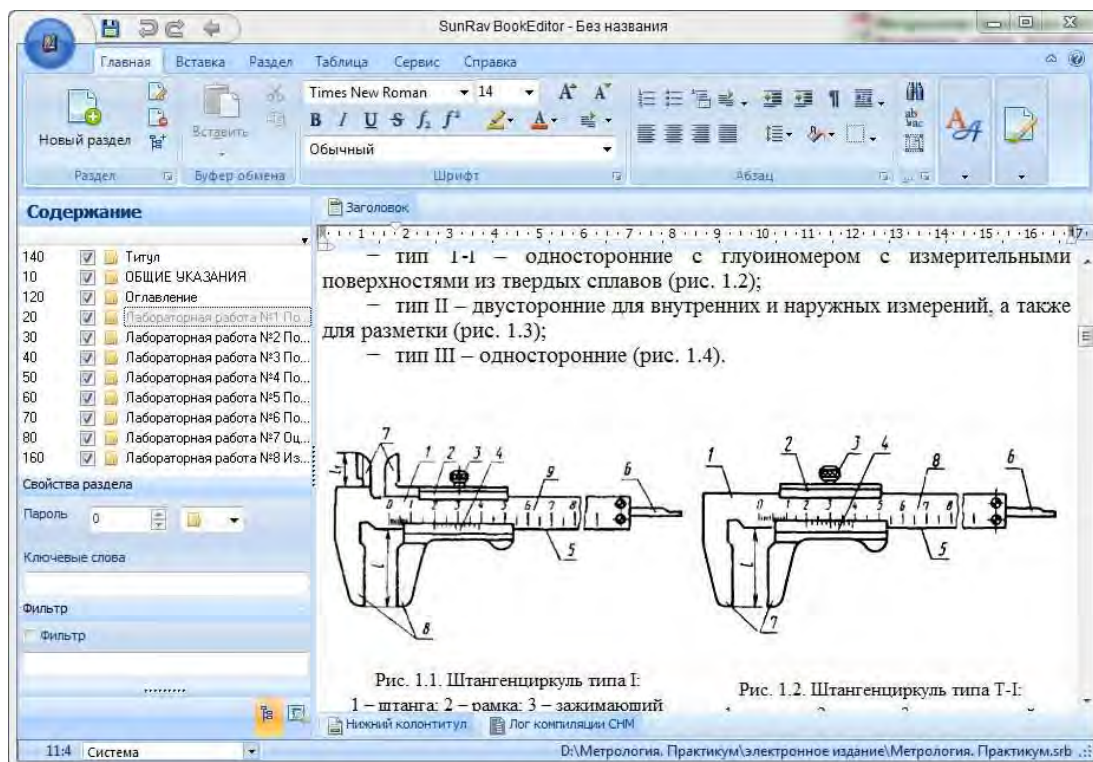


Рис. 1. Программа для создания и редактирования электронной книги BookEditor

Sunrav BookOffice также обладает широкими возможностями по внедрению мультимедийных материалов (аудио- и видеоматериалов и др.), обеспечивающих возможность демонстрации динамических процессов в их развитии, что в целом позволяет повысить как наглядность учебного материала, так и качество усвоения учебной дисциплины.

Указанный подход позволяет существенно ускорить разработку электронного пособия, однако следует заметить, что остаются значительные проблемы:

- совместимости переносимых материалов, выполненных в распространенных текстовых форматах (PDF, .doc, .docx и др.) с оболочкой Sunrav BookOffice;
- некорректного переноса сложных таблиц данных, рисунков и графиков (нарушается форматирование и группировка, подрисовочные надписи и т. п.), формул, настроек форматов текста и абзацев.

Важными достоинствами Sunrav BookOffice являются автоматическое масштабирование и трансформация учебного материала в зависимости от размера и разрешения экрана применяемого электронного устройства при просмотре в программе BookReader, что особенно актуально при широком внедрении в учебный процесс электронных книг и планшетов, а также ноутбуков самых разнообразных размеров.

В случае необходимости электронную книгу, разработанную в Sunrav BookOffice, можно экспортировать в ряд других популярных форматов (HTML, PDF, CHM, RTF, TXT), а также создавать исполняемый файл «.exe», который обеспечивает возможность работы с электронным учебным изданием на компьютерах, на которых не установлен пакет программ Sunrav, но функциональность электронного учебного издания при этом снижается, а также возникает ряд ошибок переформатирования.

Проведенная апробация программного пакета Sunrav BookOffice показала, что он обладает широким спектром возможностей, но каких-либо существенных преимуществ по сравнению с другими специализированными приложениями для создания электронных книг

и учебных пособий, предназначенных для применения только на персональных компьютерах в среде Windows, он не дает.

Таким образом, простое переиздание в формате Sunrav BookOffice электронных учебных пособий, созданных ранее с помощью Adobe Acrobat и других программ, требует серьезной переработки и обновления, что является нецелесообразным, так как не дает существенных преимуществ.

Возможности программного комплекса Sunrav также опробованы на примере контроля усвоения изучаемого материала на практическом занятии по дисциплине «Материаловедение» при изучении диаграммы состояний сплавов «свинец – сурьма» по программе tTester из состава программного пакета Sunrav TestOfficePro. Разработанная методика включает сценарий обучения и контроль знаний путем определенного тестирования, позволяет закрепить знания, полученные на лекции, и провести анализ усвоения учебного материала [4,5]. В процессе работы над изучаемым материалом осуществляется непрерывное взаимодействие обучающегося и ПЭВМ в форме обмена сообщениями посредством соответствующего интерфейса обучающей программы.

При контроле знаний порядок следования вопросов принят линейный, т. е. учебный материал обучающемуся предъявляется в строгой логической последовательности, предусмотренной сценарием. Необходимость использования линейной программы предъявления материала объясняется строгим научно-логическим единством излагаемого материала по теме. Вопросы составлены так, что для ответа на них требуются твердые знания. Ответы формируются в процессе заложенного в сценарии диалога между обучающимся и компьютером. Это обстоятельство позволяет преподавателю быстро получать необходимую информацию об уровне знаний каждого обучающегося.

Для контроля усвоения полученных теоретических и практических знаний в рамках апробации программного пакета Sunrav TestOfficePro разработан комплекс тестовых заданий.

Программа для создания тестов tMaker позволяет создавать пять типов тестовых вопросов для обучающегося:

- одиночный выбор (выбрать один из предложенных вариантов ответа);
- множественный выбор (выбрать один или несколько вариантов ответа);
- открытый вопрос (ввести ответ с помощью клавиатуры);
- упорядоченный список (расставить элементы списка в определенном порядке);
- соответствие (пользователю нужно установить соответствие между элементами двух списков).

Фрагмент программы для создания тестов tMaker для практического занятия при изучении диаграммы состояний сплавов «свинец – сурьма» дисциплины «Материаловедение» представлен на рис. 2.

В рамках апробации предлагаемого программного пакета использовались:

- одиночный выбор (выбор одного из сформулированных заранее вариантов);
- открытый вопрос (конструирование ответа осуществляется с помощью клавиатуры).

Применение открытых вопросов значительно увеличивает общее время выполнения тестовых заданий, однако полностью исключает фактор случайности при выборе ответа. Пользователь вынужден самостоятельно сформулировать ответ, что способствует закреплению полученных знаний и более объективной их оценке. При этом высокие требования предъявляются к формулировке самих открытых вопросов, которая должна обеспечивать безальтернативную формулировку правильного ответа.

Для оценки знаний предложена система счетчиков, учитывающая ряд параметров: правильность ответа; вес вопроса (количество баллов за вопрос), пропорциональный его сложности; количество времени, затраченного на ответ; ограничение времени на ответ; количество попыток ответа.

Система счетчиков производит суммирование очков. В конце работы производится итоговый анализ ответов по количеству набранных баллов и обучающему выдаются оценка его

знаний по теме и рекомендации для устранения имеющихся в них пробелов. Оценка знаний проводится по четырехбалльной шкале, каждый уровень шкалы имеет свой диапазон суммарных баллов, определенных в сценарии. В разработанном тестовом задании для оценки знаний реализована упрощенная система счетчиков, учитывающая правильность ответа, вес вопроса (количество баллов за вопрос), пропорциональный его сложности, ограничение времени на ответ.

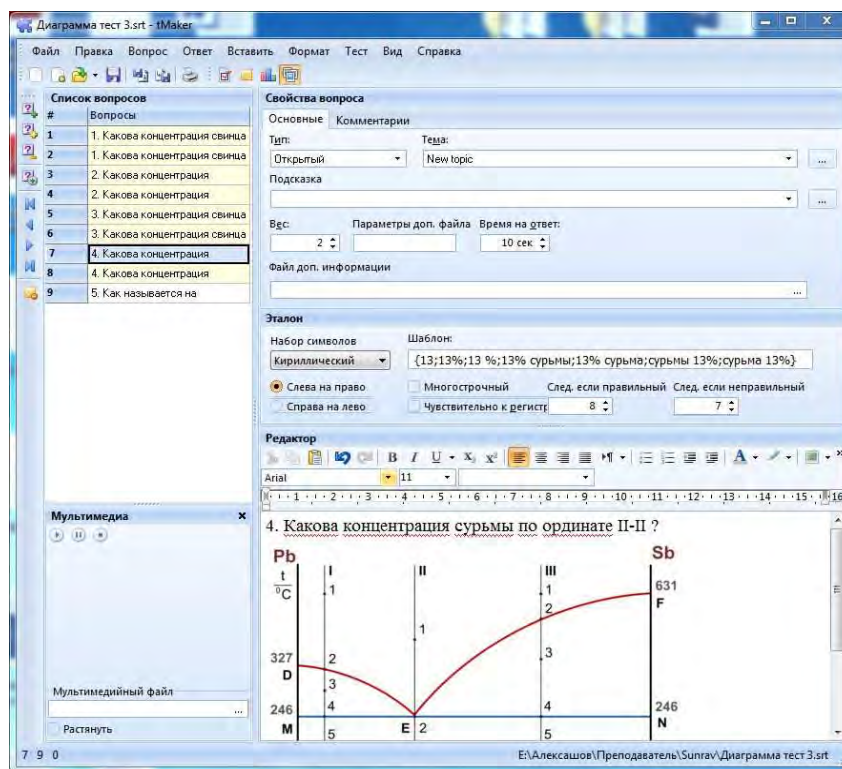


Рис. 2. Программа для создания тестов tMaker

Тестовые задания сохраняемые в собственном формате Sunrav, требуют установки программы tTester (рис. 3).

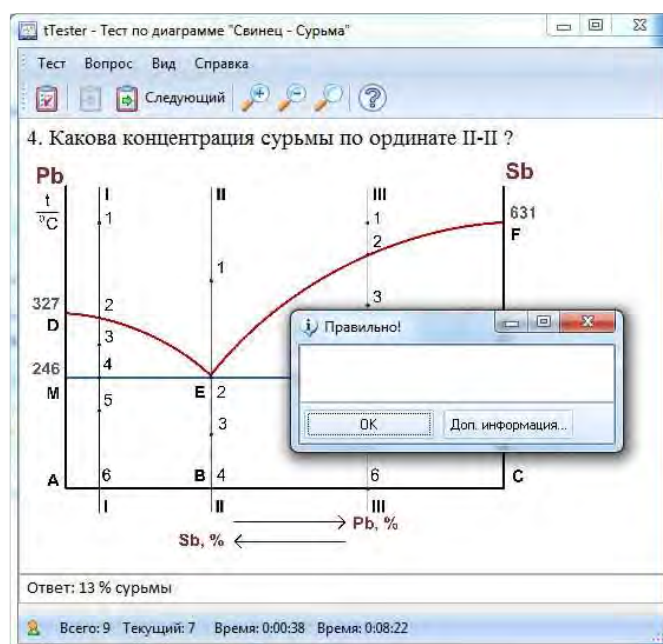


Рис. 3. Программа для проведения тестирования tTester

Но следует заметить, что тестовые задания могут запускаться только на компьютерах под управлением операционной системы Windows, что существенно ограничивает возможности по их применению.

Апробация программного пакета Sunrav TestOfficePro выявила ряд ограничений, не позволивших реализовать в полной мере предлагаемый сценарий тестовых заданий:

- при создании тестовых заданий в программе tMaker невозможно назначать штрафные баллы за просроченное время, заданное на ответ;
- не предусмотрено ограничение количества попыток ответа на поставленный вопрос: возможен либо безусловный переход к следующему вопросу после одной попытки, либо возможно неограниченное количество попыток до получения правильного ответа без наложения штрафных баллов.

Возможности нового программного продукта 1С: Электронное обучение. Конструктор курсов. Следует отметить, что к настоящему времени уже созданы новые программные продукты, которые имеют значительно меньше недостатков, присущих Sunrav BookOffice и Sunrav TestOfficePro. Например, «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов» [7]. Этот программный продукт из линейки «1С: Электронное обучение» разработан на платформе «1С: Предприятие 8.3» и является результатом развития конфигурации «1С: Бизнес-Школа».

Назначение «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов» следующее:

- разработка электронных курсов, тестовых заданий, баз данных;
- проведение процесса обучения на отдельном персональном компьютере (ПК), по локальной сети и через Интернет;
- анализ и контроль результатов обучения.

Программный комплекс «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов» позволяет решать следующие задачи:

- повышение качества, скорости и эффективности обучения благодаря применению новых информационных технологий и сокращения издержек на обучение;
- организацию структуры и регулярную актуализацию базы знаний, накопленных в образовательном учреждении;
- проведение тестирования в электронной форме, в том числе дистанционно, и аналитическую обработку их результатов.

Возможности «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов» для создания электронных курсов следующие:

- создание обучающих материалов с помощью «мастера» с использованием текстовой и графической информации, ссылок, мультимедиа файлов;
- разработка тестов и упражнений с применением более восьми типов вопросов с использованием «мастера» создания тестов;
- возможность добавления комментариев и подсказок;
- создание справочников терминов.

Возможности «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов» для проведения процесса обучения такие:

- организация обучения различными способами на ПК, через локальную сеть и Интернет;
- обучение с использованием собственных или тиражированных курсов;
- доступность информации о результатах обучения в форме отчетов по заданным критериям;
- осуществление обратной связи по итогам выполнения заданий тестов, упражнений;
- реализация функции поиска информации по всему курсу.

С учетом потребностей пользователя программный комплекс «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов» выпущен в двух версиях – *базовой* (однопользовательской) и *ПРОФ* (сетевой), отличающихся функциональными возможностями по реализации обучения в мно-

гопользовательском режиме через локальную сеть и Интернет, а также по дополнительным настройкам конфигурации.

Преимуществами использования «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов» являются:

- простота создания учебных материалов и тестов благодаря возможности загрузки в электронные ресурсы привычных исходных материалов в формате MS Word, Excel или Power Point.

- возможности обмена данными с другими программными продуктами системы «1С: Предприятие 8» и программами других производителей при создании курсов.

К настоящему времени созрела необходимость проведения апробации указанного продукта в рамках электронного обучения в стенах нашего вуза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Создание в рамках апробации программного пакета Sunrav BookOffice электронного учебного пособия по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» и контрольного тестирования при проведении практического занятия по дисциплине «Материаловедение» показало, что он обладает широким спектром возможностей, но каких-либо существенных преимуществ по сравнению с другими специализированными приложениями для создания электронных книг и учебных пособий, предназначенных для применения только на персональных компьютерах в среде Windows, он не дает.

2. Ограниченная совместимость пакета Sunrav BookOffice с рядом других популярных форматов (HTML, PDF, CHM, RTF, TXT) существенно усложняет использование ранее разработанных материалов при создании электронного пособия.

3. Программный пакет Sunrav BookOffice предназначен для применения только в среде Windows, что не позволяет использовать электронные учебные пособия на компьютерах с другими операционными системами и на портативных электронных устройствах, а следовательно, существенно ограничивает возможности их массового применения.

4. Апробация продукта Sunrav TestOfficePro при разработке контрольного тестирования при проведении практического занятия по дисциплине «Материаловедение» показала, что он обладает рядом преимуществ, позволяющих преподавателю, не обладающему специальными знаниями по программированию, создавать качественные тесты для оперативного контроля знаний, усвоенных обучающимися, но возможности этого продукта ограничены из-за того, что разработанные тесты могут запускаться только на компьютерах под управлением операционной системы Windows и оценка знаний имеет некоторые ограничения, указанные выше.

5. Необходимо рассмотреть возможность апробации и дальнейшего внедрения других современных программных комплексов по электронному обучению, например, такого, как «1С: Электронное обучение. Конструктор курсов», обладающего большими преимуществами как при разработке электронных учебных пособий, так и при разработке контрольного тестирования по сравнению с рассмотренными в данном исследовании.

Список используемых источников

1. *Завьялова Г.М.* Использование АОС при изучении дисциплин кафедры: тезисы доклада // Совершенствование подготовки офицерских кадров в свете современных требований к высшей школе: тез. докл. и сообщ. на научно-практ. конф. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1989. – С. 187.

2. *Завьялова Г.М.* Методика обучения с помощью ЭВМ по дисциплине «Специальные материалы и технология их обработки» // Инф. бюл. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1990. – № 72. – С. 23.

3. *Завьялова Г.М.* Привитие практических навыков посредством использования компьютерных технологий // Материалы межвузовской научно-теорет. конф. «Теоретические основы и практические рекомендации по совершенствованию системы формирования у обучающихся практических навыков и умений в военных образовательных заведениях». – СПб.: СПбВМИ, 2005. – С. 327–332.
4. *Алексеев Г.В., Бриденко И.И., Вологжанина С.А.* Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Материаловедение». – СПб.: Лань, 2013. – 208 с.
5. *Бужинская Н.В., Макаров И.Б.* Обзор программных средств создания электронных учебников // Междунар. журн. экспериментального образования. – 2016. – № 4–1. – С. 29–32.
6. SunRav Software. Программы для создания тестов и электронных книг. – URL: <http://Sunrav.ru> (дата обращения: 05.10.2018).
7. 1С: Электронное обучение [Электронный ресурс]. – URL: <http://v8.1c.ru/elo/wizard/> (дата обращения: 15.11.2018).

С.А. Багрецов,
доктор техн. наук, профессор;
С.М. Молдованова

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНДИДАТОВ ПО ПРОФИЛЯМ СПЕЦИАЛИЗАЦИЙ В НАУЧНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ ВУЗА

Рассматривается решение задачи рационального распределения кандидатов по профилям специализаций для случая, когда на несколько специальностей отбирается один кандидат (задача одномерного распределения кандидатов). Используется аппарат размытых множеств, позволяющий эффективно сочетать четкий количественный и качественный анализ профессиональных способностей распределяемых кандидатов, а также данных об условиях и требованиях к профессиональной деятельности, вытекающих из целевых задач научных и образовательных подразделений вуза, с опытом и интуицией лица, принимающего решения.

Ключевые слова: размытые множества, нечеткие отношения предпочтения, недоминируемые альтернативы, функция принадлежности, матрица строгого предпочтения.

Решение задачи определения рациональных направленностей (профилей) специализаций кандидатов, прошедших систему подготовки научных кадров или кадров высшей квалификации в вузе, составляет основу заключительного этапа определения их дальнейшей научной или преподавательской деятельности.

Реализация указанной задачи предполагает последовательное применение комплекса процедур принятия решения о распределении кандидатов по видам специализаций в научных подразделениях или на кафедрах. При этом учитываются результаты их предварительной научной деятельности, номенклатура и количественный состав специализаций в научных или научно-образовательных подразделениях вуза, а также субъективные мнения (пожелания) кандидатов [3]. Существующие в настоящее время методики распределения кандидатов по их должностному предназначению ориентированы в основном на эвристические методы решения, основанные на интуиции и опыте лица (лиц), принимающего решения (ЛПР). Вместе с тем в современных условиях динамичного развития систем вооружения, определяющих нередко необходимость частичной или, в отдельных случаях, полной смены базового образования, изменения предметной основы изучения новой военной техники и т. п., применение только лишь спонтанно организованных эвристических процедур принятия решения оказываются недостаточными и приводят к серьезным ошибкам, связанным, как правило, с большими затратами временных, материальных и иных ресурсов. Безусловно, указанные задачи в силу их существенной нечеткости без эвристического опыта ЛПР решены быть не могут [4, 5]. Однако необходима разработка таких методик или их комплекса, которые обеспечивали бы упорядочение (структуризацию) эвристических процедур в определенной последовательности достижения целевой задачи распределения кандидатов по должностному предназначению. Такая структуризация эвристических процедур принятия решения о распределении кандидатов обеспечит не только единое понимание самого процесса распределения с учетом системы взаимодействующих факторов, но и даст возможность учесть влияние ряда дополнительных факторов, учитывающих конкретные на данный момент условия деятельности научных и научно-образовательных структурных подразделений вуза [1, 3].

Решение перечисленных задач усложняется также тем, что при выборе наиболее целесообразного для данного кандидата вида научной или образовательной деятельности необходимо учитывать дополнительные факторы, определяющие особые условия его работы, требования, предъявляемые ему со стороны коллектива уже работающих специалистов и взаимодействующих с ним. Эти требования по виду оценки носят, как правило, нечеткий ха-

рактор и в своей основе являются отражением формальных (служебно-должностных) или неформальных отношений в коллективах вуза. Также необходимо учитывать и другие факторы, определяющие, например, условия дальнейшего научного или педагогического развития кандидата, исходя из его задатков и склонностей; морально-психологическую обстановку в коллективах и т. п. Такое количество факторов, характеризующихся чрезвычайно высокой вариативностью, изменчивостью, учесть в едином интегральном критерии профпригодности специалиста невозможно, да в этом и нет необходимости. Учет подобных нюансов является прерогативой лица, принимающего решения, или группы лиц, наделенных определенными полномочиями и обладающих структурированными в этой сфере деятельности знаниями. Система рационального распределения кандидатов по видам специализаций в этом отношении должна являться только лишь объективным советчиком, объясняющим взаимозависимость учитываемых в этом процессе факторов и явлений.

Допустим, что в результате анализа деятельности кандидата в процессе обучения в адъюнктуре кандидат был признан экспертами профессионально пригодным к деятельности, определяемой множеством $\{\gamma^*\}$ научных или преподавательских должностей, которые в совокупности представляют собой варианты альтернативных решений по распределению лица, принимающего решения.

Учитывая нечеткий характер большинства требований, предъявляемых к специалистам при выборе наиболее целесообразного вида деятельности, взаимные оценки целесообразности предпочтения данным специалистом того или иного вида деятельности из множества $\{\gamma\}$ специальностей носят нечеткий характер. В такой постановке задача определения наиболее целесообразного вида деятельности для данного кандидата может рассматриваться как задача принятия решения при нечетком отношении предпочтения на множестве альтернатив [5]. При этом количественные оценки взаимного предпочтения для рассматриваемого кандидата различных видов деятельности представляют собой функции принадлежности нечетко определенных отношений предпочтения (НОП), формально определяемых следующим образом: $\mu_R(x, y), (x, y) \in \{\gamma^*\}$, где $\mu_R(x, y)$ – НОП на множестве альтернатив $(x, y) \in \{\gamma^*\}$.

Для любой пары $(x, y) \in \{\gamma^*\}$ значение $\mu_R(x, y)$ следует понимать как степень предпочтения для данного кандидата специальности x по отношению к специальности y с уровнями развития профессионально важных качеств, определяемыми вектором \tilde{y} .

Необходимо отметить, что функция принадлежности вида μ_R обладает свойством рефлексивности, т. е. $\mu_R(x, x) = 1, \forall x \in \{\gamma^*\}$ [4, 5]. Это означает, что в данном варианте сравнения предпочтение отдается специальности x . Равенство $\mu_R(x, y) = 0$ может означать либо то, что с положительной степенью выполнимо обратное предпочтение $y > x$, либо то, что специальности x и y для данного набора профессионально важных качеств кандидата не сравнимы между собой, т. е. типологический состав профессионально важных качеств (ПВК) претендента не позволяет судить с достаточной степенью достоверности о профессиональной пригодности кандидата к выполнению специальности x или y .

Таким образом, в рассматриваемой задаче выбора наиболее предпочтительного варианта должностного определения кандидата-выпускника адъюнктуры (докторантуры) должны быть известны множество четко описанных альтернатив $\{y^*\}$ видов его будущих специализаций в сферах научной и образовательной деятельности и заданное нечеткое отношение нестрогого предпочтения $\mu_R(x, y), (x, y) \in \{\gamma^*\}$. Тогда математически задача определения рационального вида дальнейшей специализации кандидата сводится к задаче выделения в заданном множестве подмножества недоминируемых (оптимальных по Парето) альтернатив [5]:

$$\mu_{\mu}^{\text{Н.Д.}}(x) = 1 - \sup_{y \in x} [\mu_R(x, y) - \mu_R(y, x)].$$

Поскольку величина $\mu_{\mu}^{H.D.}(x)$ есть степень «недоминируемости» альтернативы x , то рациональным при заданной нечеткой информации следует считать выбор альтернатив, имеющих максимальную степень принадлежности нечеткому множеству $\mu_{\mu}^{H.D.}(x)$, т. е. тех альтернатив выбора должностного предназначения кандидата, значение функции $\mu_{\mu}^{H.D.}(x)$ которых по возможности более близкое к максимально недоминируемой величине:

$$\sup_{x \in X} \mu_{\mu}^{H.D.}(x) = 1 - \inf_{x \in X} \sup_{y \in X} [\mu_R(x, y) - \mu_R(y, x)].$$

Алгоритм решения этой задачи можно представить в виде определенной последовательности шагов.

Шаг 1. Лицу, принимающему решение, предъявляются количественные оценки ПВК кандидата, оценки его личностных характеристик и т. п. документы профессионального отбора. На основании этих документов, а также с учетом требований реальной обстановки, факторы которой были рассмотрены выше, лицо, принимающее решение, определяет параметры взаимных предпочтений выбора дальнейшей специализации кандидата, т. е. строит матрицу нечеткого отношения предпочтения μ_R специализаций для данного кандидата:

$$\mu_R = \|\mu_R(x, y)\|; \quad x, y \in \{\gamma^*\}.$$

Шаг 2. Определяется матрица соответствующего нечеткого отношения строгого предпочтения μ_R^S , элементы которой определяются по формуле

$$\mu_R^S(x, y) = \begin{cases} (\mu_R(x, y) - \mu_R(y, x)), & \text{если } \mu_R(x, y) < \mu_R(y, x); \\ 0, & \text{если } \mu_R(x, y) \geq \mu_R(y, x). \end{cases} \quad (1)$$

Шаг 3. Рассчитывается функция принадлежности нечеткого множества недоминируемых альтернатив:

$$\mu_R^{H.D.}(x) = 1 - \sup_{y \in \{\gamma^*\}} \mu_R(y, x). \quad (2)$$

Элементы множества $\mu_R^{H.D.}(x)$ определяют степень недоминируемости специализации всеми остальными специальностями из множества $\{\gamma^*\}$ возможных для данного специалиста. Степень недоминируемости определяет степень предпочтения $\mu_R^{H.D.}(x)$ специальности x всеми остальными специальностями множества $\{\gamma^*\}$.

Поскольку величина $\mu_R^{H.D.}(x)$ есть степень «недоминируемости» альтернатив $x \in \{\gamma^*\}$ определения рассматриваемому кандидату дальнейшей специализации в структурных подразделениях вуза, то рациональным определением специализации следует считать альтернативу x^* , имеющую максимальную степень «недоминируемости»:

$$x^* \Rightarrow \max_{x \in \{\gamma^*\}} \{1 - \sup_{y \in \{\gamma^*\}} \mu_R^S(y, x)\}. \quad (3)$$

Рассмотрим пример. Допустим, что в результате анализа результатов научной деятельности кандидата в адъюнктуре в отношении него было выявлено пять альтернатив его дальнейшей специализации в структурных подразделениях вуза, т. е. $x \in \{\gamma^*\} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$.

Матрица нечеткого отношения предпочтения альтернатив направленности (профиля) подготовки кандидата, составленная лицом, принимающим решения на основании набора данных и представленных документов, имеет следующий вид

$$\mu_R(x, y) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,6 & 0 \\ 0,7 & 1 & 0,7 & 1 & 0 \\ 0,8 & 0,3 & 1 & 0,9 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0,5 & 0,2 & 0,2 & 0,6 & 1 \end{vmatrix}.$$

Матрица соответствующего нечеткого отношения строгого предпочтения, вычисленная по формуле (1), имеет вид

$$\mu_R^S(x, y) = \begin{vmatrix} 0 & 0,7 & 0,8 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0,1 & 1 & 0,9 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Функция принадлежности нечеткого множества недоминируемых альтернатив выбора наиболее предпочтительной специальности в соответствии с формулой (2) для данного кандидата имеет вид $\mu_R^{H.D.}(X) = \{0,9; 0; 0,1; 1; 0,4\}$.

Заметим, что $\mu_R^{H.D.}(x_4) = 1$. Это соответствует четкому решению нечетко поставленной задачи выбора наиболее предпочтительной направленности (профиля) подготовки для рассматриваемого кандидата. Если полученных решений будет несколько, то это свидетельствует о необходимости привлечения дополнительной информации для окончательного решения задачи.

В большинстве случаев представляется целесообразным учет собственного мнения претендента о степени предпочтения им той или иной направленности (профиля) подготовки из множества возможных. В этом случае претенденту предлагается самому определить матрицу $\mu_{Ro}(X, Y)$ его нечеткого отношения предпочтения им направленности (профиля) подготовки из множества γ^* . Далее по уже изложенному выше алгоритму определяется функция принадлежности нечеткого множества недоминируемых альтернатив собственного мнения претендента о выборе им направленности (профиля) подготовки. Допустим, что такая функция $\mu_{Ro}^{H.D.}(x)$ определена. Тогда итоговая функция принадлежности нечеткого множества недоминируемых альтернатив выбора $\mu_{Ru}^{H.D.}(x)$ может быть представлена следующим образом:

$$\mu_{Ru}^{H.D.}(x) = \mu_{Ro}^{H.D.}(x) \& \mu_R^{H.D.}(x), \quad (4)$$

где операция $\&$ в теории размытых множеств определяется как операция пересечения функций предпочтения и определяется в виде $\min(\mu_R^{H.D.}(x), \mu_{Ro}^{H.D.}(x)), \forall x \in \gamma^*$.

Допустим для предыдущего примера, что в результате проделанных расчетов получено следующее значение функции предпочтения кандидатом специальностей $\mu_{Ro}^{H.D.}(x)$:

$$\mu_{Ro}^{H.D.} = 1; 0; 0,5; 0,8; 0,6.$$

Тогда итоговое значение функции принадлежности недоминируемых альтернатив выбора направленности (профиля) подготовки с учетом мнения кандидата будет равно:

$$\mu_R^{H.D.} = 0,9; 0; 0,1; 0,8; 0,4.$$

Следовательно, если целесообразно учитывать мнение претендента о его дальнейшей специализации, то следует скорректировать выбор его специальности со специальности x_4 на специальность x_1 .

В некоторых случаях в интересах повышения степени достоверности принимаемых решений для определения наиболее предпочтительной для данного претендента специальности привлекается группа специалистов, знакомых с особенностями альтернативных вариантов специализаций. В этом случае ЛПР, оставаясь руководителем группы распределения кандидатов, может оценивать их мнения как неравнозначно значимые с точки зрения их компетентности. Относительная важность мнений экспертов может быть представлена с помощью матрицы нечеткого отношения предпочтения ЛПР их мнений т. е. $\phi_R(k_1, k_2)$; $k_1, k_2 \in \mathcal{E}$, где \mathcal{E} – множество экспертов, дополнительно привлекаемых для определения рациональной специализации претендента.

В соответствии с оценками каждого из экспертов $k \in \mathcal{E}$ нечеткие отношения предпочтения между отдельными профилями специализаций описываются рядом матриц нечеткого отношения предпочтения вида: $\mu_{Rk}(x, y)$; $x, y \in \{\gamma^*\}$; $k \in \mathcal{E}$. В этом случае определение рациональной специализации претендента будет сводиться к нижеследующей последовательности шагов принятия решения.

Шаг 1. Как и в предыдущем алгоритме, для каждой матрицы нечеткого отношения предпочтения отдельных профилей специализации находим нечеткие множества недоминируемых альтернатив с учетом мнений каждого из экспертов. Обозначим $\|\mu_k^{H,D}\|_{xk} = \{\mu_R^{H,D}(x, k); x \in \{\gamma^*\}; k \in \mathcal{E}\}$ матрицу недоминируемых альтернатив специализаций $x = 1, |\gamma^*|$ для экспертов $k = 1, |\mathcal{E}|$.

Шаг 2. Корректируем матрицу $\|\mu_k^{H,D}\|_{xk}$ недоминируемых альтернатив специализаций с учетом весовых коэффициентов α_k ($\sum_{k \in \mathcal{E}} \alpha_k = 1$) значимости для ЛПР мнений экспертов:

$$\|\mu_{k\alpha}^{H,D}\| = \|\mu_k^{H,D}\|_{xk} \cdot \|\alpha_k\|_k.$$

Шаг 3. Находим рациональный вариант специализации кандидата:

$$x^* \rightarrow \sup_k [\min\{\mu_R^{H,D}(x, k) \cdot \alpha_k; x \in \{\gamma^*\}\}; k \in \mathcal{E}].$$

Если наибольшую степень недоминируемости имеет не одна специальность, а несколько, то ЛПР может либо сам выбрать одну из них, исходя из своих дополнительных соображений, либо расширить круг дополнительно привлекаемых экспертов.

На практике в классе задач одномерного распределения кандидатов часто встречаются задачи, когда из нескольких кандидатов необходимо выбрать одного, компетенции которого позволяли бы обеспечивать решение нескольких важных для практики задач, составляющих, например, целостное направление научной деятельности. Такая ситуация обычно связана с определением руководителей научных коллективов (военно-научных школ). Рассмотрим решение такой задачи с позиций рассмотренных выше понятий недоминируемости альтернатив. Будем считать, что на множестве кандидатов $x, y \in X$, подлежащих распределению по должностному предназначению, являющихся фактически альтернативами выбора, определены нечеткие отношения предпочтения $\mu_{Rq}(x, y)$ эффективного решения ими комплекса задач рассматриваемого направления научной деятельности. Здесь $q = 1, m$ – основные задачи научного направления. Сложность решения такой задачи заключается в необходимости совокупного учета всех отношений предпочтения в оценке степеней недоминируемости эффективных альтернатив. Кроме того, следует принимать во внимание естественную неравнозначность важности задач в предполагаемой научной деятельности, т. е. считать известными их весовые коэффициенты λ_q ($\sum_{q=1}^m \lambda_q$).

Для решения задачи воспользуемся методом свертки отношений предпочтения [4, 5]. Принимая его во внимание, определяем последовательность решения задачи следующим образом:

1. Определяем пересечение исходных отношений возможностей решения кандидатами задач научного направления:

$$\mu_{RQ}(x, y) = \min\{\mu_1(x, y), \dots, \mu_m(x, y)\}.$$

Определяем нечеткое подмножество недоминируемых альтернатив во множестве:

$$(X, \mu_{Q1}) : \mu_{Q1}^{H,D} = 1 - \sup_{y \in X} [\mu_{Q1}(x, y) - \mu_{Q1}(y, x)].$$

2. Определяем свертку отношений Q_2 с учетом весовых коэффициентов значимости задач научного направления:

$$\mu_{Q2}(x, y) = \sum_{q=1}^m \lambda_q \mu_q(x, y).$$

С учетом полученных отношений определяем подмножество недоминируемых альтернатив во множестве (X, μ_{Q_2}) : $\mu_{Q_2}^{H.D} = 1 - \sup_{y \in X} [\mu_{Q_2}(x, y) - \mu_{Q_2}(y, x)]$.

3. Определяем пересечение множеств $\mu_{Q_1}^{H.D}$ и $\mu_{Q_2}^{H.D}$:

$$\mu^{H.D}(x) = \min\{\mu_{Q_1}^{H.D}(x), \mu_{Q_2}^{H.D}(x)\}.$$

4. Определяем наиболее предпочтительного для решения данного комплекса задач кандидата x^* из множества X :

$$X^{H.D}(x) = \{x | x \in X, \mu^{H.D}(x) = \sup_{x^*} \mu^{H.D}(x^*)\}.$$

Рассмотрим пример решения задачи об определении должностного назначения одного из трех кандидатов на должность руководителя научной группы. В группе необходимо развернуть научные исследования по трем научным направлениям. В отношении кандидатов экспертами определены взаимные отношения предпочтения R_1 , R_2 , R_3 возможности каждого из них реализовать указанные научные направления, т. е.

R_1	x_1	x_2	x_3								
x_1	1	1	0	R_2	x_1	x_2	x_3				
x_2	1	1	0	x_1	1	1	1	R_3	x_1	x_2	x_3
x_3	0	0	1	x_2	0	1	1	x_1	1	1	0
				x_3	0	0	1	x_2	1	1	0
								x_3	1	0	1

Определяем отношение $Q_1 = R_1 \cap R_2 \cap R_3$:

$$\mu_{Q_1}(x_i, y_j) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Подмножество недоминируемых альтернатив в множестве (X, μ_{Q_1}) имеет вид

$$\mu_{Q_1}^{H.D}(x_i) = \{x_1 = 1; x_2 = 0; x_3 = 1\}.$$

Считая задачи одинаково важными, т. е. $Q_2 = 1/3(\mu_1(x_i, y_j) + \mu_2(x_i, y_j) + \mu_3(x_i, y_j))$, получим

	x_1	x_2	x_3
x_1	1	1	0
x_2	1	1	0
x_3	0	0	1

$$\mu_{Q_2}(x_i, y_j) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/3 \\ 2/3 & 1 & 2/3 \\ 1/3 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\mu_{Q_2}^{H.D}(x_i) = \{x_1 = 1; x_2 = 2/3; x_3 = 1/3\}.$$

Результирующее множество недоминируемых альтернатив будет определено выражением

$$\mu^{H.D}(x_i) = \{x_1 = 1; x_2 = 0; x_3 = 1/3\}.$$

Таким образом, наиболее рациональным выбором руководителя научной группы следует считать первого кандидата, имеющего максимальную степень недоминируемости. Необходимо отметить, что последовательное применение сверток отношений предпочтения позволяет сузить класс рациональных выборов на основе учета дополнительной информации об относительной степени недоминируемости эффективных альтернатив.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, решение задач определения рациональных профилей специализации кандидатов, прошедших систему подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации в вузе, и рационального распределения кандидатов по профилям специализаций должно базироваться на методиках, применение которых позволит эффективно сочетать четкий количественный и качественный анализ данных о распределяемых кандидатах из системы подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации, данных об условиях и требованиях к профессиональной деятельности, вытекающих из целевых задач научных и образовательных подразделений вуза, с опытом и интуицией лица, принимающего решения. Рассмотренные выше методики позволят математически корректно, на основе применения математического аппарата размытых множеств решать задачи рационального выбора специализаций кандидатов с учетом всех аспектов требований, предъявляемых образовательным процессом в вузе. Подобная методика выбора специализации кандидата может быть осуществлена на любом этапе его обучения с последующей его коррекцией.

Список используемых источников

1. Диагностика социально-психологических характеристик малых групп с внешним статусом : учеб. пособие / С. А. Багрецов, В. М. Львов, В. В. Наумов и др. – СПб.: Лань; Изд-во С-Пб. ун-та МВД России, 1999. – С. 200–203.
2. Багрецов С.А., Оганян К.М., Пророк В.Я. Основы построения и организация адаптивных систем профессионального отбора / под ред. С.А. Багрецова. – СПб.: Лань, 2003. – 329 с.
3. Багрецов С.А., Костецкая Г.В. Расчет параметров ранговой шкалы оценок многомерных объектов с неоднородными характеристиками // Изв. вузов. Сер. Естественные науки. – 2014. – № 6. – С. 5–11.
4. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. – Киев: Издательский дом «Слово», 2008. – 344 с.
5. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой информации. – М.: Наука. Гл. ред. физико-мат. лит. – 1981. – 208 с.
6. Мамаев В.Л. Терехов А.К. Анализ тенденций формирования и проблем воспроизводства кадрового потенциала науки // Бюлл. ВАК России. – 1996. – № 3.
7. Тимофеева Ю.Ф. Роль модульной системы высшего образования в формировании творческой личности педагога-инженера // Высш. образование в России. – 2004. – № 4. – С. 119–125.
8. Старбинский Э.И. Как управлять персоналом. – М.: АРИЭЛ, 2005.

С.А. Багрецов,
доктор техн. наук, профессор;
С.М. Молдованова

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА КАНДИДАТОВ В СИСТЕМЕ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ КАДРОВ (КАДРОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ), СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯМ ФОРМИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ВУЗЕ

Рассматривается решение задачи прогнозирования количественного и качественного состава кандидатов на входе систем подготовки адъюнктов и докторантов в вузе, обеспечивающего на ее выходе требуемое для реализации задач данного направления научной и научно-образовательной деятельности военного вуза число специалистов научной и высшей квалификации. В методике учитывается нечеткость исходных данных о профессиональных и личностных характеристиках контингента кандидатов, отражающих их нечеткую принадлежность к различным квалификационным группам, определяющих их возможности (в целом нечеткие) по успешному завершению подготовки в адъюнктуре или докторантуре по тому или иному назначению профессиональной научной или научно-преподавательской деятельности в вузе. Соотношение образов контингента кандидатов на входе системы подготовки и на ее выходе рассматривается с точки зрения определения образа и прообраза двух множеств при их нечетком определении. Методика учитывает «отсев» кандидатов из системы подготовки и возможность их многозначного участия в формировании научных специалистов различных специализаций.

Ключевые слова: система подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации; функции принадлежности; нечеткое соответствие; образы и прообразы нечетких множеств.

Современная динамика развития систем вооружения определяет необходимость формирования новых научных и научно-педагогических направлений деятельности военного вуза. В этой связи возникает задача подготовки и доподготовки научно-педагогических работников вуза, обеспечивающих решение новых как научных, так и образовательных задач. При этом очевидно, что динамика их подготовки в вузе должна быть согласована с оперативным временем поставок промышленностью новых систем вооружения в войска. Это предъявляет особые требования как к самой системе подготовки научных и научно-педагогических кадров, так и к планированию процесса их формирования. Важным условием успешного решения этой задачи является решение задачи прогнозирования количественного и качественного состава кандидатов на входе систем подготовки адъюнктов и докторантов в вузе, обеспечивающего на ее выходе требуемое для решения задач данного направления научной деятельности число специалистов научной и высшей квалификации. Внутри этих групп возможна более подробная классификация, исходя, например, из их квалификации, определяющей дальнейшее их предназначение в качестве старших научных сотрудников, старших преподавателей, руководителей предметно-методических комиссий и т. д. Кроме того, как показывает практика, немаловажное значение имеют личностные характеристики кандидатов на вакантные должности в научной и образовательной сферах деятельности вуза. Их значимость во многом определяется необходимостью учета способности кандидатов преодолеть трудности освоения нового направления деятельности, связанные с необходимым освоением новых знаний, новых методов преподавания и т. д. Значимость этих факторов также подчеркивается многочисленными исследованиями различных авторов [1, 2, 3, 6, 7]. Важным аспектом решения задач этого направления является необходимость количественного учета всех этих факторов в конечных оценках числа кандидатов каждой из групп, выделенных в ходе их предварительной дифференциации по личностным, профессиональным и иным признакам,

существенным для решения предстоящих задач. Применяемые в настоящее время методики решения подобных задач, как правило, детерминированы и не учитывают в полном объеме перечисленные выше факторы [2, 4, 5, 7].

Сложность решения указанных задач определяется существенной нечеткостью исходных данных о профессиональных и личностных характеристиках контингента кандидатов каждой из групп, отражающих их возможности (в целом нечеткие) по успешному завершению подготовки в адъюнктуре или докторантуре по тому или иному назначению профессиональной научной или преподавательской деятельности.

Допустим, что таких групп выделено M . В целом они отражают существующую дифференциацию кандидатов по их профессиональным, социальным, личностным и иным значимым для решения задач подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации признакам. Кроме того, будем также полагать, что лицом, принимающим решение (экспертом), в отношении каждой группы претендентов на формируемые должности научно-педагогических работников определены степени соответствия входящих в них кандидатов признакам их описания.

Таким образом, определено нечеткое соответствие вида $(\tilde{\Gamma})$:

$$\tilde{\Gamma} = (\tilde{X}, Y, F).$$

Здесь \tilde{X} – нечеткое множество $\tilde{X} = \{\mu_{\tilde{X}}(x_i) | x_i > 1; x_i \in X\}$, определяющее суперпозицию множества $X = \{x_i : i = \overline{1, M}\}$, элементы x_i которого определяют количество кандидатов, профессиональные, личностные и иные выделенные характеристики, которые соответствуют i -й группе кандидатов на подготовку в профильных научных направлениях адъюнктуры и военной докторантуры (подготовки необходимых специалистов научной и высшей квалификации), где $\mu(x_i) \in [0, 1]$ – степень принадлежности кандидатов к i -й группе, отражающая степень соответствия профессиональных, социальных, личностных и иных признаков кандидатов, входящих в группу, признаковому пространству группы;

Y – множество $Y = \{y_j; j = \overline{1, N}\}$, определяющее план подготовки необходимого количества специалистов j -го профиля за директивное время T ;

F – множество функций предпочтения $F(x_i, y_j) = \{\alpha(x_i, y_j), (x_i, y_j); i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}\}$ возможности подготовки кандидатов i -й группы как научных или педагогических работников j -го профиля научного направления, где $\alpha(x_i, y_i) \in [0, 1]$ – степень предпочтения подготовки специалистов профиля научного направления j из контингента кандидатов, профессиональные и личностные характеристики которых соответствуют i -й группе.

Следует отметить, что в силу многообразия профессиональных, социально-психологических и личностных групповых форм представления кандидатов на переподготовку в системе подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации вуза может быть справедливым неравенство $M \neq N$.

Наличие нечеткого множества \tilde{X} определяется в ряде случаев низкой степенью фактической достоверности о профессиональных и иных данных набора отдельных групп контингента претендентов, подлежащих распределению по направлениям подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации в интересах обеспечения научной и научно-образовательной деятельности вуза в формируемом направлении научной деятельности. Поэтому множество $\mu_{\tilde{X}} = \{\mu_{\tilde{X}}(x_i) : i = \overline{1, M}\}$ фактически является установленной на основе предварительного собеседования членов экспертной группы с кандидатами нечеткой характеристикой контингента кандидатов (претендентов), с учетом которой далее определя-

ются объем и состав необходимого для выполнения плана подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации в вузе в интересах данного направления последующей научной деятельности.

Таким образом, в формальной постановке задачи известны: план Y подготовки научных кадров в военной докторантуре и кадров высшей квалификации в адъюнктуре в интересах обеспечения научной и образовательной деятельности вуза, существующее нечеткое распределение кандидатов (претендентов) по группам классификации их профессиональных и личностных характеристик, нечеткие ограничения на возможность подготовки специалистов определенных профилей $j = \overline{1, N}$ научной деятельности из контингента $i = \overline{1, M}$ кандидатов различных групп. Требуется определить такой количественный состав $X = \{x_i; i = \overline{1, M}\}$ кандидатов каждой группы, который бы с учетом нечеткости определения их профессиональных и личностных характеристик, определяющих принадлежность к группе, и нечеткой оценки их возможностей успешной подготовки по j -му научному профилю обеспечивал бы выполнение плана Y подготовки научных кадров в военной докторантуре и кадров высшей квалификации в адъюнктуре в интересах развития научной и образовательной деятельности вуза.

В указанной постановке задачи множества $X = \{x_i; i = \overline{1, M}\}$ и $Y = \{y_j; j = \overline{1, N}\}$ соотносятся как образы и прообразы элементов x_i и y_j при нечетком соответствии $\tilde{\Gamma} = (\tilde{X}, Y, F)$ [3, 4].

Определение 1. Образом $\tilde{\Gamma}(x_i)$ элемента $x_i \in X$ при нечетком соответствии $\tilde{\Gamma} = (\tilde{X}, Y, F)$ называется нечеткое множество

$$\tilde{\Gamma}(x_i) = \{\mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(x_i)}(y_j); y_j \in Y\}, \quad (1)$$

где $\mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(x_i)}(y_j) = \mu_{\tilde{X}}(x_i) \& \alpha(x_i, y_j) = \min\{\mu_{\tilde{X}}(x_i), \alpha(x_i, y_j)\}$.

Определение 2. Прообразом элемента $y_j \in Y$ при нечетком соответствии $\tilde{\Gamma} = (\tilde{X}, Y, F)$ называется нечеткое множество

$$\tilde{\Gamma}(y_j) = \{\mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(y_j)}(x_i); x_i \in X; j = \overline{1, N}; i = \overline{1, M}\}, \quad (2)$$

где $\mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(y_j)}(x_i) = \mu_{\tilde{X}}(x_i) \& \alpha(y_j, x_i)$.

По существу содержания выполнения операций определения образа элемента $x_i \in X$ по отношению к элементу $y_j (j = \overline{1, N})$ параметр $\mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(x_i)}(y_j)$ определяет с точки зрения лица, принимающего решение, степень уверенности $\alpha(x_i, y_j)$ успешной подготовки специалистов профиля j при условии, что кандидаты (претенденты), поступающие в систему подготовки, относятся к квалификационной группе i .

При определении прообраза элементов y_j в отношении каждой специализации j на выходе системы подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации определяется степень принадлежности $\alpha(y_j, x_i)$ уровней подготовки претендентов, профессиональные и иные характеристики которых соответствуют кандидатам i -й группы.

Как следует из вышеприведенных определений, для определения количественного состава контингента кандидатов на входе системы подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации в вузе необходимо первично оценить общее число кандидатов каждой группы на основе определения параметров образа состояния множества кандидатов по группам их классификации, а затем скорректировать их распределение с учетом возможности их многозначного участия в формировании специалистов профиля j , определяемого функцией при-

надлежности $\alpha(x_i; y_j)$, на выходе системы подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации в вузе с учетом их возможного «отсева». Для этого в соответствии с определением нечеткого образа элемента $x_i \in X$ по отношению к заданному элементу $y_j (j=1, N)$ при нечетком соответствии $\tilde{\Gamma} = (\tilde{X}, Y, F)$ определим (ориентировочно) требуемое количество претендентов $(x_j : j=1, N)$ с учетом участия в подготовке всех групп кандидатов, обеспечивающих выполнение плана $y_j (j=1, N)$ подготовки научных сотрудников. Для этого рассмотрим нечеткое уравнение $y_j = \sum_{x \in \tilde{\Gamma}(x_i)} \mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(x_i)}(y_j) x_j$. Тогда получим

$$x_j = y_j / \sum_{x \in \tilde{\Gamma}(x_i)} \mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(x_i)}(y_j), j=1, N, \quad (3)$$

при следующем условии: если $\sum_{x \in \tilde{\Gamma}(x_i)} \mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(x_i)}(y_j) > 1$, то $\sum_{x \in \tilde{\Gamma}(x_i)} \mu_{\tilde{\Gamma}^{-1}(x_i)}(y_j) = 1$.

Полученный численный состав групп кандидатов является избыточным по определению и требует коррекции. В качестве способа определения корректирующих перераспределения Z_{ij} кандидатов для выполнения плана подготовки специалистов в вузе используем принцип максимально значимого распределения претендентов по видам научных специализаций, суть которого сводится к следующему. В первую очередь распределяются претенденты на замещение вакантных должностей в системе обеспечения нового научного направления деятельности вуза первой группы ($i=1$), имеющей максимальную степень принадлежности в нечетком множестве X , т. е. $\mu_{\tilde{X}}(x_i)|_{i=1} = \max_{x \in X} (\mu_{\tilde{X}}(x_i))$.

Ранжирование групп необходимо проводить также, например, на основе ранжирования по условию определения наиболее предпочтительных групп кандидатов, осуществление подготовки которых целесообразно по наиболее важным специальностям научной и образовательной деятельности в вузе в текущий момент времени. В общем случае такая ранжировка может быть выполнена на основе применения нечетких методов ранжирования объектов различной природы, содержание которых изложено в работе [2]. Если важность j -й научной специализации определяется коэффициентом p_j , то условие выбора первой по номеру в ранжированном ряду подгруппы кандидатов на прохождение обучения в адъюнктуре (докторантуре) при формировании нового направления научной деятельности в вузе необходимо осуществлять на основе соотношения $i=1 \rightarrow \max_i \alpha(x_i; y_j)$, где $y_j \rightarrow \max_j p_j$. При этом выполняется условие относительно соотношения требований в специалистах профиля k и наиболее предпочтительного для их подготовки состава кандидатов (например, группы 1),

т. е. $k \rightarrow \max_{y_i \in Y} F(x_i; y_j)$. При этом $Z_{1k} = \begin{cases} x_1, & \text{если } y_k \geq x_1; \\ y_k, & \text{если } y_k < x_1. \end{cases}$

Остаток нераспределенных кандидатов указанной группы $\Delta x_i = x_i - Z_{ik}$ направляется на подготовку научных специалистов профиля y_m , такого, что $\mu_{\tilde{F}}(x_i; y_m) = \max_{y \in Y / y_k} \mu_F(x_i; y)$.

Процесс распределения претендентов группы 1 продолжается, пока $\Delta x_i \geq 0$ и не будут удовлетворены потребности в кандидатах, обеспечивающих подготовку научных кадров по всем видам других специальностей из допустимых для них интервалов численного значения специалистов данного профиля. Дополнительные потребности (если они будут) могут быть удовлетворены за счет соседних групп кандидатов.

Далее точно таким же образом распределяются кандидаты остальных групп. В результате получаем уточненное множество кандидатов X на входе системы подготовки и их распреде-

ление по профилям подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации заданного направления научной деятельности в вузе. Понятно, что в этом процессе возможен «отсев» кандидатов вследствие невыполнения ими задач подготовки или неудовлетворения профилям специализации $j = \overline{1, N}$ на определенных этапах ее реализации. Обозначим $\alpha_{ij} (i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N})$ коэффициенты «отсева» претендентов, характеристики которых соответствуют i -й группе при отборе их по j -му профилю специализации научных кадров. Тогда с учетом коэффициентов возможного «отсева» окончательное значение количества претендентов i -й группы классификации кандидатов будет определяться выражением $X_i = \sum_{j=1}^N X_{ij}(\alpha_{ij} + 1)$, где X_{ij} – составляющая вектора X распределения кандидатов i -й группы по дальнейшей специализации $j = \overline{1, N}$ научной деятельности.

Рассмотрим пример решения задачи. В вузе актуализируется новое научное направление научной деятельности, которое предполагает формирование соответствующих научных исследований и организацию нового направления в учебно-образовательном процессе вуза. В ходе анализа содержания научного направления и сопутствующего ему научно-образовательного процесса был определен состав обеспечивающих эту деятельность вуза научных кадров и кадров высшей квалификации. Необходимо определить количественный состав и структуру контингента кандидатов, если известно, что по профессиональным и личностным характеристикам они подразделяются на $M=3$ группы, т. е. $i = \overline{1, 3}$, а количество профилей специализации (т. е. специалистов научного профиля, специалистов научно-образовательной деятельности и специалистов высшей квалификации), по которым производится отбор кандидатов, тоже равно, $N=3$, т. е. $j = \overline{1, 3}$. В соответствии с выражениями (1) и (2) функции принадлежности $\mu_x(x_i)$ и $\mu_F(x_i, y_j)$ будут равны:

$$\begin{aligned}\mu_x(x_i) &= \{0,2; 0,8; 0,4\}; \\ \mu_F(x_i, y_j) &= \{0,8; 0,4; 0,1; 0,8; 0,6; 0,2; 0,9; 0,5; 0,2\}.\end{aligned}$$

Определим параметры расплывчатого множества $\tilde{\Gamma}(x_i)$:

$$\tilde{\Gamma}(x_i) = \{0,2; 0,4; 0,1; 0,2; 0,6; 0,2; 0,2; 0,5; 0,2\}.$$

Допустим, что план отбора специалистов научной квалификации определяется следующими параметрами: старших научных сотрудников – $y_1 = 2$; научных сотрудников – $y_2 = 3$; преподавателей – $y_3 = 4$.

Этап 1. Определим ориентированные значения величин необходимого множества кандидатов, исходя из оценки нечеткого образа X при нечетком соответствии $\tilde{\Gamma} = (\tilde{X}, Y, F)$:

$$2 = 0,2x + 0,4x + 0,1x = 0,7x \Rightarrow x = \frac{2}{0,7} = 2,9;$$

$$3 = 0,2x + 0,6x + 0,2x \Rightarrow x = \frac{3}{1} = 3;$$

$$4 = 0,2x + 0,5x + 0,2x \Rightarrow x = \frac{4}{0,9} = 4,4.$$

Определим число кандидатов каждого класса их дифференциации по их профессиональным и личностным характеристикам, необходимое для выполнения плана подготовки научных специалистов в вузе (в данном примере только научной квалификации):

$$x_1 = 0,2 \cdot 2,9 + 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4,4 = 2,1;$$

$$x_2 = 0,4 \cdot 2,9 + 0,6 \cdot 3 + 0,5 \cdot 4,4 = 5,2;$$

$$x_3 = 0,1 \cdot 2,9 + 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4,4 = 1,7.$$

Этап 2. Выполним ранжировку групп кандидатов (претендентов) по степени их предпочтения в процессе формирования научных кадров рассматриваемого научного направления. Будем полагать, что ранжировка степеней предпочтения осуществляется с учетом параметров степеней предпочтения подготовки кандидатов (претендентов) различных классификационных групп для формирования научных кадров и кадров высшей квалификации в интересах обеспечения научной и научно-образовательной деятельности вуза. Указанные степени предпочтения могут учитывать ряд дополнительных факторов, определяющих особенности предполагаемой научной и научно-образовательной деятельности (например, предпочтение может быть отдано кандидатам, имеющим опыт научной деятельности или, наоборот, имеющим опыт практической работы в войсках). В общем виде функцию предпочтения, учитывающую дополнительные факторы, представим следующим образом: $Y(x_j) = \{0,5; 0,3; 0,3\}$. Отсюда видно, что в данном случае ранжировка степеней принадлежности кандидатов совпадает с ранее их определенными порядковыми номерами. Определим потребность в кандидатах специалистов различных групп:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= 2,0; & Z_{12} &= 0,1; & Z_{13} &= 0; \\ Z_{21} &= 0; & Z_{22} &= 2,9; & Z_{23} &= 2,3; \\ Z_{31} &= 0; & Z_{32} &= 0; & Z_{33} &= 1,7. \end{aligned}$$

Таким образом, кандидаты первой группы обеспечивают выполнение плана подготовки старших научных сотрудников и частично научных сотрудников; кандидаты второй группы – научных сотрудников и преподавателей; кандидаты третьей группы – преподавателей кафедры данного научного направления деятельности вуза.

Этап 3. Будем полагать коэффициенты отсева различных групп кандидатов следующими:

$$\alpha_{1j} = 0,2; \quad \alpha_{2j} = 0,3; \quad \alpha_{3j} = 0,1, \quad \forall j = 1,3.$$

Тогда окончательно получим требуемое количество кандидатов на входе системы подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации в интересах обеспечения научной и научно-образовательной деятельности вуза, которое равно: $X_{y1} = 3,48 \approx 4$; $X_{y2} = 3,9 \approx 4$; $X_{y3} = 4,84 \approx 5$. Общее число претендентов в системе подготовки научных кадров вуза в интересах формирования заданного научного направления должно составлять 13 человек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изложенная выше методика позволяет на основе имеющегося плана формирования научных кадров и кадров высшей квалификации в интересах обеспечения научной и научно-образовательной деятельности вуза определить количественный состав кандидатов на поступление в адъюнктуру (докторантуру) с учетом их дифференциации по профессиональным, личностным и иным характеристикам. При этом имеется возможность учесть нечеткость предполагаемой структуры распределения кандидатов по группам классификации их профессиональных и личностных характеристик, степень предпочтения использования кандидатов указанных групп для отбора по каждому из профилей научной специализации в вузе, а также коэффициенты «отсева» кандидатов в процессе обучения в адъюнктуре или докторантуре.

Полученные в результате расчетов данные определяют требования, предъявляемые к набору кандидатов, удовлетворение которых обеспечивает выполнение плана подготовки научных кадров и кадров высшей квалификации по данному направлению научной деятельности. Кроме того, полученные данные позволяют предъявить соответствующие требования к самой квалификационной и личностной подготовке кандидатов, связанные с оценкой пред-

полагаемого объема и интенсивности научных работ в данном направлении научной деятельности в вузе.

Список используемых источников

1. Диагностика социально-психологических характеристик малых групп с внешним статусом : учеб. пособие / С. А. Багрецов, В. М. Львов, В. В. Наумов и др. – СПб.: Лань\$ Изд-во С-Пб. ун-та МВД России, 1999. – С. 205–208.
2. *Багрецов С.А., Костецкая Г.В.* Расчет параметров ранговой шкалы оценок многомерных объектов с неоднородными характеристиками // Изв. вузов. Сер. Естественные науки. –2014. – № 6. – С. 5–11.
3. *Багрецов С.А., Оганян К.М., Пророк В.Я.* Основы построения и организация адаптивных систем профессионального отбора / под ред. С.А. Багрецова. – СПб.: Лань, 2003. – 329 с.
4. *Зайченко Ю.П.* Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. – Киев: Издательский дом «Слово», 2008. – 344 с.
5. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой информации. – М.: Наука. Гл. ред. физико-мат. лит. – 1981. – 208 с.
6. *Тимофеева Ю.Ф.* Роль модульной системы высшего образования в формировании творческой личности педагога-инженера // Высш. образование в России. – 2004. – № 4. – С. 119–125.
7. *Тупоносова Е.П.* Моделирование потребности в кадрах высшей квалификации в Самарской области // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. – 2011. – Т. 13, № 4 (4). – С.1236–1238.

С.А. Багрецов,
доктор техн. наук, профессор;
Т.Э. Черная

МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ИНДИВИДУАЛЬНО-ГРУППОВОГО ОБУЧЕНИЯ В ВУЗЕ

В статье рассматривается модель изучения практических дисциплин, связанных с процессами приобретения обучаемыми знаний, навыков и умений управления объектами, составляющими основу их будущей профессиональной деятельности. В основу модели положен трансформационный подход, рассматривающий процесс обучения в виде совокупности взаимно переходящих друг в друга этапов (стратегий) формирования знаний, навыков и умений решения специальных задач управления изучаемыми объектами. Рассмотрена методика оценки параметров модели обучения и определены условия перехода (трансформационные точки) от одной стратегии обучения к другой с учетом форм, методов и применяемых средств обучения, сложности решаемых задач, индивидуальных особенностей обучаемых и их значимости в групповой структуре межличностных отношений.

Ключевые слова: тактико-специальные задачи, трансформационная теория, стратегия обучения, модель обучения, метод наименьших квадратов, индивидуальный статус, евклидово расстояние, метод локальных вариаций.

Вопросы оптимизации процесса практического обучения (в смысле повышения эффективности и снижения затрат) всегда являлись предметом особого внимания со стороны руководителей разных уровней, участвующих в его организации. Важной частью этого процесса являются выбор и формирование соответствующей модели обучения. В настоящее время доминирует макроподход к анализу процессов обучения, предполагающий монотонный характер изменения его ведущих показателей эффективности (например, роста обученности, уменьшения времени выполнения операций и т. п.). Такой подход определял и выбор модели обучения, на основе которой далее рассчитывались ключевые параметры процесса практической подготовки обучаемых (интенсивность обучения, время и стоимость обучения, предельно достижимый уровень обученности, объем и периодичность контроля знаний и т. д.).

Вместе с тем исследования когнитивных процессов формирования знаний, умений и навыков (далее – ЗУН) управления современными человеко-машинными комплексами убедительно показывают, что процесс обучения носит не монотонный, а нелинейный полиструктурный характер и представляется сложной динамикой эволюции и трансформации стратегий, применяемых в процессе обучения [1, 2, 3]. При этом процесс обучения может описываться традиционными монотонными моделями лишь в частных случаях, на этапах применения конкретных стратегий обучения. Переход от одной стратегии к другой может быть обусловлен либо снижением сложности выполнения заданий за счет ее большей специализации, либо за счет возрастания информации, используемой в ходе дальнейшего решения учебных задач. Таков, например, переход от репродуктивных форм обучения к конструктивным, творческим формам обучения.

Таким образом, закон трансформаций описывает образование новых знаний, выработку новых навыков и умений, их интерференцию между собой, переносы, построение умозаключений, познавательный прогресс, а также возникновение ассоциаций в трансформации и связывании образов и мыслей в интерактивном процессе познания.

В контексте трансформационной теории обучения взаимодействие специалиста (обучаемого) со средой следует понимать как единство его приспособления к условиям, задачам, функциям деятельности, умение реализовать профессиональную деятельность с заданной эффективностью [1, 3]. Различные стратегии активного владения знаниями представляются

через регулируемые связи между критериями эффективности деятельности и факторами сложности деятельности. Параметры модели обучаемого M_o в трансформационной теории описываются характеристическими кривыми (портретами), которые в общем виде могут быть представлены как волнообразный процесс накопления знаний, навыков и умений по решению определенного класса задач, отражающий изменения интенсивностей процесса обучения вследствие последовательной смены стратегий обучения (рис.1) [1].

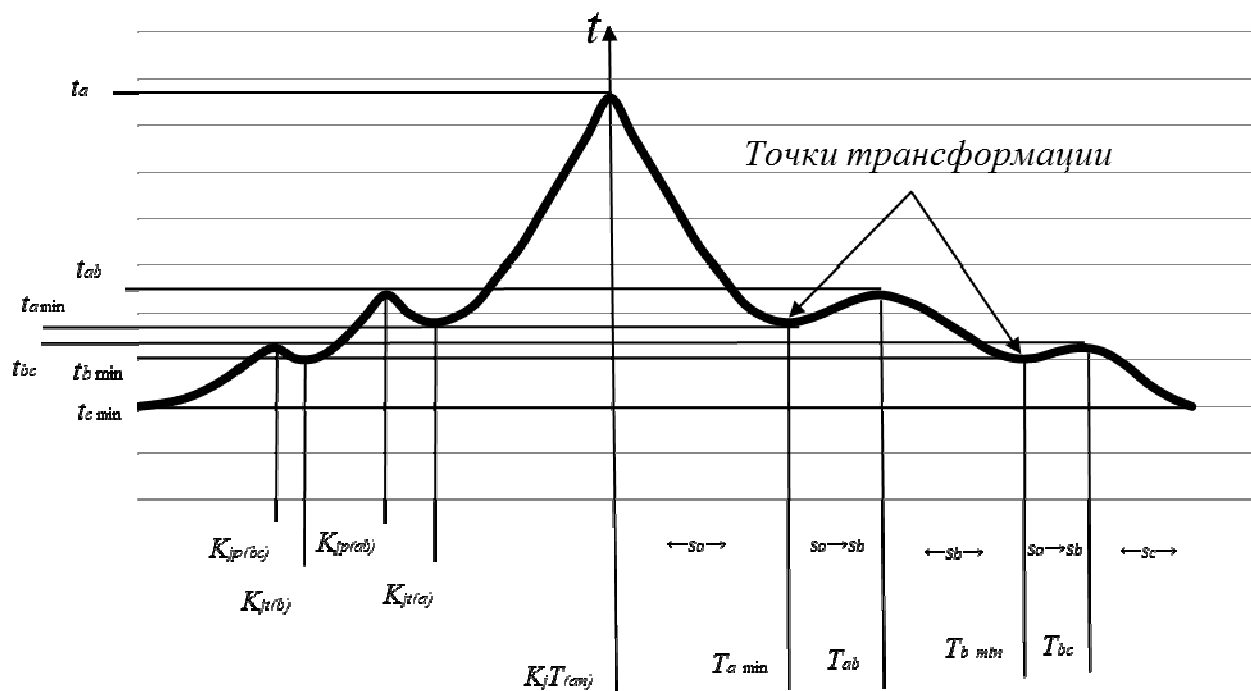


Рис. 1. Динамика изменения кривой обучения:

K – уровень знаний (обученности); T – время обучения; t – среднее время решения задачи;
 t_{an} – время начального выполнения задания; S_a , S_b и S_c – стратегии;

$T_{a \min}$, $T_{b \min}$ – минимальное время решения задачи при применении промежуточных стратегий S_a и S_b ; T_{ab} , T_b – время (трансформационные точки) перехода от стратегии S_a к стратегии S_b ; t_{\min} – минимальное время решения задачи при применении стратегии S_c

Левая половина диаграммы отражает динамику изменения сложности выполнения задания при смене стратегий обучения, правая половина – динамику изменения психологических факторов сложности интеллектуальной деятельности обучаемого, непосредственно зависящих от применяемых методов обучения и уровня подготовки специалиста. Как видно, в каждом последующем периоде трансформации стратегии обучения эффективность когнитивного процесса возрастает. В трансформационных точках при смене стратегий эффективность обучения на некоторое время падает вследствие возникновения нестандартной ситуации, например стрессовой, вызванной необходимостью перестройки деятельности и освоения новой стратегии решения задач. Поэтому следует говорить не о когнитивном прогрессе или регрессе, а о когнитивной динамике в целом. Задача обучения в этом случае заключается в преобразовании характеристического портрета обучаемого в начале обучения (M_k) в требуемый характеристический портрет специалиста (M_B). Будем полагать наличие определенных знаний, умений и опыта у обучаемых к моменту начала практического обучения, что обуславливает необходимость введения и учета при синтезе алгоритма обучения коэффициента новизны знаний (начального уровня знаний), определяемого сравнением либо целевых

функций Z^* и результатов тестового контроля X' до начала обучения, либо характеристических портретов деятельности обучаемых на моменты начала (M_k) и окончания (M_a) обучения.

Заметим, что данное M_o модельное описание обучаемого предназначено исключительно для перехода к последующему рассмотрению проблем отбора и структурирования содержания обучения (синтеза модели M_{co}) и не претендует на то, чтобы служить базой для решения каких-либо других психолого-педагогических проблем. Поэтому далее намеренно исключаем из модельного описания M_o ряд факторов, существенных при рассмотрении целостной личности. Прежде всего, вводим ограничение на механизм формирования обучаемым цели, тем самым предполагая у него наличие некоторого фиксированного уровня мотивации, достаточного для овладения данной программой обучения [2, 3]. Вместе с тем нельзя не учитывать далее большую неоднородность состава групп обучаемых, различие в уровне их подготовленности к решению ПЗ, степени их включенности в общую структуру их будущей профессиональной деятельности и т. д., предполагая прежде всего доминирование индивидуально-группового метода практического обучения по управлению сложными человеко-машинными комплексами.

В работе [1] на основе статистических данных показано, что, исходя из правил инвариантности интегральной эффективности систем любого уровня объектов физической природы (социально-экономической, технической и т. д.), можно утверждать, что развитие, происходящее с периодическими трансформационными изменениями стратегий их развития происходит быстрее, чем монотонное. Вместе с тем, принимая трансформационную теорию обучения в качестве базовой, необходимо обозначить и решить ряд задач. Первой, и очень важной, является задача определения момента перехода с одной стратегии изучения материала на другую (т. е. определения точек трансформации), вторая задача связана с выбором самой стратегии обучения, обеспечивающей повышение эффективности когнитивного процесса познания методов и приемов управления изучаемым объектом. В первом случае необходимо определить такую трансформационную точку (т. е. время изучения материала или количество занятий) в процессе обучения, ниже которой переход на новую стратегию приведет к значительному спаду эффективности вследствие неготовности специалиста к восприятию новой стратегии, а выше которой приобретенные навыки и умения приобретают консервативную форму и становятся тормозом в восприятии нового. В данной статье подробно рассмотрим методику решения только первой задачи. Принципы решения второй задачи будут рассмотрены в последующих статьях этого направления исследований.

Исходя из данных выше представлений, специальную (практическую) подготовку обучаемых следует рассматривать как итерационный процесс постепенной эволюции стратегии решения ими практических задач (ПЗ). При этом базовую основу знаний навыков и умений каждого этапа составляют результаты предыдущего этапа, реализуемые в рамках совокупности стратегий (методов, способов) решения практических задач, изучаемых (рассматриваемых) на предыдущих этапах обучения.

Таким образом, переход от одного этапа к другому в рамках изучения j -й темы ($j=1, M$) специальной подготовки обучаемых предполагает изменение стратегии (стратегий) решения задач с вытекающей отсюда необходимостью дополнительного изучения ПЗ с последующим их применением и отработкой в практике управления изучаемой техникой или технологическими процессами в различных ситуациях и т. п. Именно такой процесс последовательного, итерационного приобретения практических знаний и навыков обучаемыми и составляет сущность трансформационного подхода к изучению дисциплин, связанных с освоением процессов управления изучаемыми объектами.

С точки зрения индивидуально-личностного обучения указанный подход предполагает наличие системы управления процессом приобретения и совершенствования практических ЗУН каждым обучаемым. Это касается прежде всего определения момента необходимого перехода от одной совокупности стратегий решения ПЗ задач к другой, а также контроля показателя интенсивности и других параметров обучения в отношении каждого обучаемого с

последующей корректировкой распределения преподавателем содержания занятий, применяемых методик и технических средств обучения в плане реализации личностно-ориентированной системы подготовки обучаемых. Реально такие данные могут быть получены на основе определения параметров статистической модели обучения.

Как следует из анализа литературы [1], [2], [5], [10], [11] и результатов практических исследований, модель приобретения практических навыков и умений управления при использовании неизменной совокупности стратегий решения ТС задач достаточно точно может быть представлена экспоненциальной зависимостью. Как отмечено в работе [1], этот вид аппроксимации кривой обучения стал прочной традицией в целом ряде прикладных отраслей, в частности в психологии, эргономике и т. д. В работе [10] рассматриваются математические методы расчета такой кривой обучения по трем и даже по двум точкам.

Параметры рассматриваемой модели должны отражать смысловое содержание целевых критериев процесса обучения. Основными из них являются достигнутый уровень знаний, навыков и умений в решении практических специальных задач и время их безошибочного решения. В первом случае достигнутый уровень знаний (уровень обученности) определяется как отношение усвоенных на требуемом уровне практических знаний по j -й теме ко всему объему ЗНУ j -й темы.

Однако при окончательном выборе модели обучения следует учитывать, что результаты обучения могут быть связаны не только с фактором времени, а и с влиянием множества, в отдельных случаях, других факторов (например, с условиями обучения, с мотивационной направленностью обучаемых и т. д.). Поэтому необходима оценка степени коррелированности временного фактора, выбранного в данном случае в качестве ведущего, и текущих статистических данных уровней обученности. С учетом предполагаемого вида модели коэффициент ее корреляции со статистическими данными $Q_i(s, t_i)$ ($i = 1, n$) будет определяться выражением

$$r_t = \frac{\left[\sum_{i=1}^n t_i \ln(Q_i(s, t_i)) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n t_i \ln(Q_i(s, t_i)) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (\ln(Q_i(s, t_i)))^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln(Q_i(s, t_i)) \right)^2 \right]}.$$

Для проверки гипотезы о наличии корреляционной связи между временным фактором и статистическими данными рекомендуется использовать t -критерий, вычисляемый по формуле [5]

$$t_r = \frac{|r_t| \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_t^2}} \geq t_{0.05; (n-2)},$$

где $t_{0.05; (n-2)}$ – 5%-ная точка распределения Стьюдента с $(n-2)$ степенями свободы.

Если указанное неравенство выполняется, то гипотеза о наличии корреляционной связи принимается. Аналогичным образом оценивается степень влияния на результаты обучения других факторов. Далее будем считать, что модель определяется только фактором времени. Модель процесса обучения с учетом этого критерия может быть представлена экспонентой вида [4]

$$Q(s, t) = Q_{\text{пред}}(s) - \alpha(Q_{\text{пред}}(s)) \cdot e^{-\lambda(s)t}. \quad (1)$$

Здесь $Q_{\text{пред}}(s)$ – предельное значение уровня обученности для данного обучаемого применения S -й стратегии решения ТС задач;

$\alpha(Q_{\text{пред}}(s))$ – искомый коэффициент модели, зависящей от $Q_{\text{пред}}(s)$, $\alpha(Q_{\text{пред}}(s)) = Q_{\text{пред}}(s) - Q_{\text{нач}}(s)$, где $Q_{\text{нач}}(s)$ – начальный уровень обученности;

$\lambda(s)$ – интенсивность обучения;

t – время обучения.

В качестве параметра успешности решения ТС задач обычно рассматривают время их безошибочного решения. Тогда $Q(s, t)$ и $Q(s)$ будут являться временными характеристиками модели. Это соответственно $T(s, t)$ – текущее время безошибочного решения специальных задач по модели и $T_{\text{пред}}(s)$ – предельное (максимально низкое для рассматриваемого обучаемого) время безошибочного решения задач. Причем $T(s, t)$ есть наблюдаемые в отдельные отрезки времени $(t_i; i = 1, n)$ временные характеристики решения обучаемым ТС задач.

В случае принятия в качестве критериальной основы модели временных характеристик безошибочного решения задач она будет иметь вид

$$T(s, t) = T_{\text{пред}}(s) + (T_{\text{нач}}(s) - T_{\text{пред}}(s)) \cdot e^{-\lambda_t(s)t} = T_{\text{пред}}(s) + a_t(s) \cdot e^{-\lambda_t(s)t}, \quad (2)$$

где $T_{\text{нач}}(s)$ – начальное (до начала обучения) время безошибочного решения задач при условии применения S -й стратегии изучения учебного материала;

$T_{\text{пред}}(s)$ – предельное время безошибочного решения задач с учетом применения S -й стратегии обучения;

$\lambda_t(s)$ – интенсивность обучения при применении S -й стратегии обучения (повышения оперативности решения задач).

Как видно, модели (1) и (2) схожи по существу внутреннего содержания, только модель (1) отражает экспоненциальный рост объема знаний, навыков и умений обучаемого решать практические задачи, а модель (2) отражает экспоненциальное уменьшение времени их безошибочного решения. Выбор критериальной основы зависит от внутреннего содержания задач управления изучаемыми объектами на различных этапах обучения. Например, в теме «Порядок проведения контроля функционирования аппаратуры и оценка ее состояния» критериальную основу составляют в основном временные характеристики безошибочного решения задач. В интересах конструктивности дальнейшего анализа моделей обучения в качестве основы далее будем рассматривать модель (1) динамики изменения уровня обученности.

При наличии статистики $Q_i(s, t_i)$ ($i = 1, n$) уровней обученности при применении S -й стратегии обучения для определения коэффициентов $a(T_{\text{пред}}(s))$, $\lambda_t(s)$ модели (1) наиболее эффективно может быть использован метод наименьших квадратов [5]. В общем случае задача определения параметров кривой обучаемости будет сводиться к определению таких их значений, при которых степень расхождения модельных результатов оценки обученности с фактическими данными статистического анализа будет минимальна. Однако прямое применение этого метода усложняется наличием неизвестного параметра предельного уровня обученности $Q_{\text{пред}}(s)$. Его наличие связывают с ограниченностью «когнитивного ресурса» обучаемого [11]. По мнению Дружинина [11], каждой задаче соответствует свой объем когнитивного ресурса, необходимого для ее решения. Когнитивный ресурс определяет выбор стратегии индивида при решении задач, а именно: от упрощения задачи при недостатке когнитивного ресурса до сложных альтернативных форм мышления при свободном оперировании избыточными ресурсами. Приближение уровня обученности индивида к его предельному значению свидетельствует об исчерпании его когнитивных ресурсов на данном этапе обучения. Однако ресурс – это не только ограничения, но и возможности, предоставляемые субъекту средствами обучающей среды для эффективного приобретения опыта на основе применения новых стратегий обучения.

В настоящее время в моделях обучения большинства авторов [1–5] данный параметр определяется как заданный. Для его определения предлагаются эвристические процедуры оценки предельных возможностей дидактической системы обучения [6, 7] с учетом индивидуальных характеристик обучаемых в представлении их максимальных возможностей усвоения данного предмета обучения или темы. Вместе с тем понятно, что определение этого параметра должно рассматриваться объективно, с точки зрения упомянутых выше когнитивных ресурсов обучаемых, в рамках единого алгоритма определения коэффициентов аппрок-

симации модели (1). Рассмотрим порядок решения этой задачи с точки зрения указанного подхода в два этапа.

На первом этапе значения $Q_{пред}^*(S)$ принимаются как варьируемые в диапазоне возможных значений ($\Delta Q_{пред}$) неизвестные. Тогда задача определения параметров $a(S)$ и $\lambda_t(S)$ в соответствии с методом наименьших квадратов может быть представлена следующим образом [5, 7]:

$$\sum_{i=1}^n \left[\left(Q_i(s, t_i) - Q_{пред}^*(S) \right) + a(s) \cdot e^{-\lambda(s)t_i} \right]^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Применяя метод наименьших квадратов, получим следующие аналитические выражения параметров модели (1):

$$\left. \begin{aligned} \lambda \left(Q_{пред}^*(S) \right) &= \frac{\sum_{i=1}^n t_i \ln Q_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n \ln Q_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}; \\ a \left(Q_{пред}^*(S) \right) &= \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln Q_i - \left(\lambda \left(Q_{пред}^*(S) \right) \right) \cdot \sum_{i=1}^n t_i \right], \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $Q_i = Q_{пред}^*(S) - Q_i(s, t_i)$.

На втором этапе решается однопараметрическая задача определения оптимального значения $Q_{пред}^{**}(S)$. Для определения этого параметра рассмотрим евклидово расстояние $d^2(Q, Q_M)$ между наблюдаемыми значениями обученности ($Q_i; i = \overline{1, n}$) и значениями обученности ($Q_{Mi}; i = \overline{1, n}$), вычисленными по модели (1) с определенными по выражениям (4) коэффициентами аппроксимации при фиксированных значениях $Q_{пред}^*(S)$. Тогда задача оценки указанного параметра будет сводиться к определению такого его значения, варьируемого в некоторой области $\Delta Q_{пред}$, при котором евклидово расстояние между модельными $Q_{Mi}(S, Q_{пред}^*)$ и наблюдаемыми значениями обученности $Q_i(S)$ ($i = \overline{1, n}$) будет минимальным:

$$d^2(Q, Q_M) = \sum_{i=1}^n (Q_i(S) - Q_{Mi}(S, Q_{пред}^*))^2 \rightarrow \min_{Q_{пред}^*(S)}, \quad (5)$$

где $Q_{пред}^*(S) \in \Delta Q_{пред}$.

Задача (5) в представленной постановке рассматривается как однопараметрическая задача определения экстремума функции (5) по изменяющемуся параметру $Q_{пред}^*(S)$. Среди большого числа методов решения подобных задач наиболее эффективными являются градиентные методы, и в частности метод локальных вариаций искомого параметра $Q_{пред}^*(S)$ [6, 7]. Найденное значение оптимального параметра $Q_{пред}^{**}(S)$ является искомым для данного обучаемого предельным значением обученности при условии применения стратегии S в решении специальных практических задач j -й темы подготовки.

Оценка степени соответствия полученного уравнения регрессии статистическим данным уровней обученности осуществляется на основе расчета показателя корреляции (индекса корреляции):

$$r_{tQ} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{ост}^2}{\sigma_Q^2}}, \quad (6)$$

где σ_Q^2 – общая дисперсия показателей обученности, $\sigma_Q^2 = \frac{1}{n} \sum (Q_i(S) - \overline{Q_i(S)})^2$;

$\sigma_{ост}^2$ – остаточная дисперсия, определяемая из уравнения регрессии, $\sigma_{ост}^2 = \frac{1}{n} \sum (Q_i(S) - Q_{Mi}(S, Q_{пред}^{**}))^2$.

С учетом достаточно малого объема статистических данных наблюдения за процессом обучения важным вопросом описания корреляционных связей результатов моделирования реального процесса обучения является построение доверительных интервалов для истинного значения r_{tQ} . В работе [5] показано, что значение r_{tQ} с доверительной вероятностью $(1 - \alpha)$ заключено в пределах

$$\text{th}z_2 < r_{tQ} < \text{th}z_1, \quad (7)$$

где $\text{th}z$ – гиперболический тангенс от аргумента z (z – преобразование Фишера);

$Z_{1,2} = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r_{tQ}}{1-r_{tQ}} \pm \left(\frac{U_{\alpha/2}}{\sqrt{n-3}} - \frac{r_{tQ}}{2(n-1)} \right)$, причем $U_{\alpha/2} - \frac{\alpha}{2} \cdot 100\%$ – точка стандартного нормального распределения [5].

Полученные значения параметров моделей (1) и (2) позволяют, с одной стороны, вовремя скорректировать процесс обучения с точки зрения соответствия требуемым параметрам обученности, а с другой – осуществить прогноз необходимого времени обучения до требуемого уровня обученности и оценки времени начала перехода на новую стратегию решения практических задач.

Требуемое время до заданного уровня обучаемости ($Q_{\text{треб}}; T_{\text{треб}}$) соответственно для первой и второй моделей будет определяться выражениями:

$$T_{\text{зад}} = \frac{1}{\lambda(S)} \left[\ln a(S) - \ln \left(Q_{\text{пред}}^{(S)} - Q_{\text{треб}}^{(S)} \right) \right]; \quad (8)$$

$$T_{\text{зад}} = \frac{1}{\lambda_t(S)} \left[\ln a_t(S) - \ln \left(T_{\text{пред}}^{(S)} - T_{\text{треб}}^{(S)} \right) \right]. \quad (9)$$

В модели (8) параметры $Q_{\text{пред}}^{(S)}, Q_{\text{треб}}^{(S)}$ являются показателями предельного и требуемого уровней обучаемости. Аналогичные значения, но только для времени решения задач, имеют и показатели модели (9).

Выявленные на основании формул (8), (9) резерв и дефицит временных ресурсов свидетельствуют о потенциальных возможностях обучающей кафедры. Их реализация или, наоборот, компенсация требует решения таких важных задач, как определение рационального содержания дополнительного учебного материала в рамках формирования новой стратегии обучения, определения рациональной последовательности изучения учебных задач, определения рационального состава технических средств обучения и т. д. При этом необходимо, чтобы выполнялось неравенство $Q_{\text{пред}}^{(S)} > Q_{\text{треб}}^{(S)}$. Невыполнение этого неравенства свидетельствует о недостижимости частных целей обучения и является сигналом к пересмотру структуры учебного процесса, т. е. его организации, методического и технического обеспечения. Такой же вывод следует сделать и при невыполнении неравенства $T_{\text{зад}} < T_{\text{доп}}$, где $T_{\text{доп}}$ – допустимые сроки изучения и практического освоения данного цикла изучаемых задач. Аналогичные замечания характерны и для второй модели.

Оценка указанных параметров модели осуществляется в каждом цикле контроля уровня приобретенных обучающимися ЗУН. При этом уровень приобретенных знаний $Q_i(S)$ ($i = 1, n$) при условии неизменения стратегии обучения S постепенно будет приближаться к предельному значению $Q_{\text{пред}}^{**}$.

В работе [4] на основании статистических данных учебного процесса указывается, что подготовка и постепенная перестройка стратегии изучения материала практических задач должна начинаться до момента достижения обучающимся предельных значений уровней обученности. Рекомендованный уровень обученности для начала формирования новой стратегии обучения составляет 0,7–0,78 % от предельных значений для данной стратегии обучения. Наличие такого порога авторы обосновывают необходимостью поддержания требуемой динамики восприятия учебного материала. В противном случае старая стратегия решения специальных задач может стать доминирующей и будет препятствовать применению новых методик их решения. Таким образом, измеряя на каждом шаге контроля t_i процесса обучения величину $\Delta_i Q(S) = Q_{\text{пред}}^{**}(S) - Q_i(S)$, определяем расход когнитивного ресурса обучаемого при условии применения данной стратегии обучения. Совокупность последовательностей $\Delta_i Q(S)$ ($i = 1, n$) образует временной ряд $\Delta_i Q(S, t_i; i = 1, n)$, имеющий определенный тренд. Параметры формализации тренда можно определить обычными методами МНК, используя в качестве независимой переменной – время t_i ($i = 1, n$), а в качестве зависимой переменной –

фактические уровни временного ряда $\Delta_i Q(S, t_i; i = 1, n)$. В тех же целях можно использовать и коэффициенты автокорреляции уровней ряда [7, 8]. В целом такой подход позволит обеспечить заблаговременное прогнозирование необходимой смены стратегий обучения и их подбор, исходя из анализа результатов обучения.

Принимая во внимание в целом коллективный характер обучения, необходимо определить пороги перехода к новой стратегии в отношении всей группы. Анализ этого феномена предполагает учет статусных потенциалов членов коллектива и системы межличностных отношений в группе в сфере учебной деятельности. В этих аспектах анализ учебных коллективов достаточно полно выполнен в работах [8] и [9].

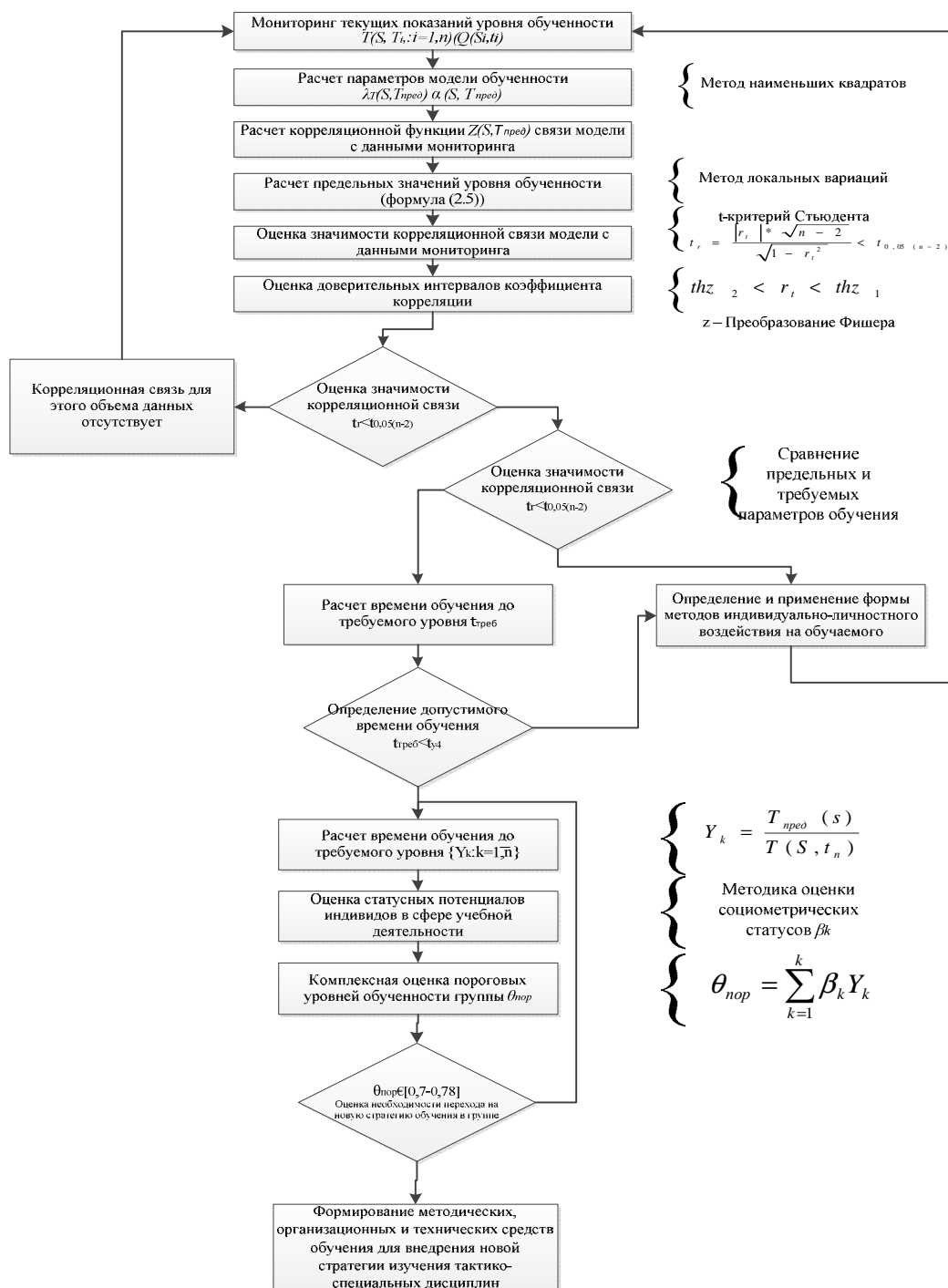


Рис. 2. Методика учета индивидуально-личностных и групповых параметров обучения

Наличие статусных потенциалов позволяет, опираясь в целом на рекомендации работы [9], по пороговым значениям перехода на новую стратегию обучения рассчитать их для группы в целом:

$$\theta_{\text{пор}} = \sum_{k=1}^n \beta_k Y_k, \quad (10)$$

где β_k – статусный потенциал k -го обучаемого группы в сфере учебной деятельности;

Y_k – уровень обученности k -го обучаемого группы по отношению к его предельному значению, определенному по моделям (1) и (2).

Если пороговое значение $\theta_{\text{пор}}$ соответствует диапазону 0,7–0,78, то это свидетельствует о необходимости перехода в целом в группе к новой стратегии изучения специальных задач, связанных с практическим освоением изучаемых объектов. В целом такой подход предполагает необходимость непрерывного мониторинга параметров процесса обучения каждого обучаемого по моделям (1) и (2), отражая тем самым важность сохранения личностно-ориентированной системы обучения в рамках ее коллективной формы организации. Структурная схема методики учета индивидуально-личностных и групповых параметров обучения по специальным дисциплинам на основе трансформационного подхода, обеспечивающей реализацию трансформационного подхода к процессу обучения, представлена на рис. 2. В качестве критериального параметра уровня обученности рассматривается время решения практических задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трансформационная теория обучения позволяет наиболее полно реализовать концепции непрерывного образования и деятельностного подхода. В ней различные стратегии деятельности в заданном диапазоне условий активного овладения знаниями представляются через регулируемые связи между критериями эффективности деятельности и факторами ее сложности, а процесс обучения представляется как непрерывный процесс управляемой трансформации от одной структуры-стратегии учебной деятельности к другой через общее для этих структур-стратегий состояние. Описание целей обучения в рамках трансформационной теории возможно в терминах деятельности, а конечная цель подготовки формулируется как обеспечение реализации качества обучения не ниже минимально допустимого. Реализация такого подхода требует пересмотра основных концепций активизации индивидуального и группового мышления обучаемых с позиций рассмотрения их как компонентов системы обучения. В этом случае процесс обучения следует рассматривать как процесс их взаимной адаптации в разрезе определения закономерностей этих изменений в ходе приобретения знаний, навыков и умений, их развития и трансформаций. В свою очередь, такой подход требует перехода от монотонных моделей процессов приобретения знаний и динамики их развития к полиструктурным, трансформационным моделям.

Список используемых источников

1. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта. Эволюция, психология информатика. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
2. Басова Н.В. Педагогика и практическая психология. – Ростов н/Д: Феникс, 2000. – 416 с.
3. Сергеев С.Ф. Обучающие и профессиональные иммерсионные среды. – М.: Народное образование, 2009. – 432 с.
4. Беспалько В.П. Образование и обучение с участием компьютеров. – Воронеж: Изд-во НПО «МОДЭК», 2002. – 352 с.

5. Багрецов С.А., Тарасов А.В., Ачкасов Н.Б. Психолого-педагогический эксперимент: организация и методы обработки результатов: моногр. – СПб., 2008. – 347 с.
6. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений : учеб. пособие. – М.: Проспект, 2014. – 176 с.
7. Экономико-математические методы и прикладные модели: учеб. пособие для вузов/ В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, Д.М. Дайибегов и др.; под ред. В.В. Федосеева. – М.: ЮНИТИ, 1999. – 391 с.
8. Малая группа: структура, отношение, лидерство : учеб. пособие / С.А. Багрецов, В.М. Львов, О. Лонес, О.В. Нагиева. – Тверь: 2008. – 236 с.
9. Диагностика социально-психологических характеристик малых групп с внешним статусом : учеб. пособие / С. А. Багрецов, В. М. Львов, В. В. Наумов и др. – СПб.: Лань; Изд-во С-Пб. ун-та МВД России, 1999. – 640 с.
10. Введение в эргономику / Г.М. Зараковский, Б.А. Королев, В.И. Медведев, П.Я. Шлаен. – М.: Сов. радио, 1974. – 352 с.
11. Дружинин В.Н. Когнитивные способности: структура, диагностика, развитие. – СПб.: ИМАТОН-М, 2001. – 248 с.

Ю.М. Богук,
кандидат военных наук;
М.А. Голубев,
кандидат военных наук, доцент;
Д.В. Ставицкий;
А.В. Фетисов,
кандидат военных наук, доцент

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ У ВЫПУСКНИКОВ ВОЕННО-УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

В статье представлена последовательность разработки модели формирования компетенций у выпускников военно-учебных заведений, основанной на комплексе последовательных действий преподавателей и курсантов для достижения требуемого (необходимого) уровня сформированности таких компетенций. Данная модель может быть использована должностными лицами военно-учебного заведения, принимающими участие в организации образовательной деятельности, по реализации основных профессиональных образовательных программ.

Ключевые слова: военно-учебное заведение, компетенция, метод, моделирование, модуль, образовательная деятельность.

Глубокие изменения в системе подготовки специалистов, связанных с реформированием ВС РФ, потребовали значительных изменений в управлении образовательной деятельностью с целью повышения качества профессиональной подготовки. Поставленная цель достижима лишь при высокой профессиональной компетентности должностных лиц, непосредственно управляющих образовательной деятельностью в образовательных учреждениях. Логично предположить, что в этих условиях для повышения качества подготовки на требуемом уровне необходимо иметь не только систему управления, позволяющую адаптировать образовательную деятельность военно-учебного заведения (вуза) к сложившимся условиям и требованиям документов по руководству подготовкой специалистов, но и обосновать методы управления, позволяющие на научной основе реализовывать оптимальные управляющие воздействия на различных этапах обучения. Разработка таких методов возможна только на основе моделирования процесса формирования компетенций у выпускников военно-учебных заведений, так как на этой основе можно прогнозировать и качество их подготовки. Поэтому, на взгляд авторов, содержание статьи является весьма актуальным.

Под процессом формирования компетенций при подготовке выпускников логично понимать комплекс совокупных действий преподавателей и обучающихся с целью достижения требуемого (необходимого) уровня сформированности таких компетенций. Анализ процесса формирования компетенций [1] показал, что разработку модели процесса формирования компетенций у выпускников вуза целесообразно проводить в соответствии с этапами, представленными на рис. 1.

Исходя из условий организации педагогической деятельности на основе компетентностного подхода, целью подготовки выпускников вузов является формирование у них компетенций на уровне, обеспечивающем успешное выполнения функциональных обязанностей на первоначальных должностях в соответствии с современными условиями и требованиями. Таким считается определенный на основе практического опыта уровень формирования компетенций, составляющий 0,8 от максимального (соответствует общей оценке хорошо) [1].

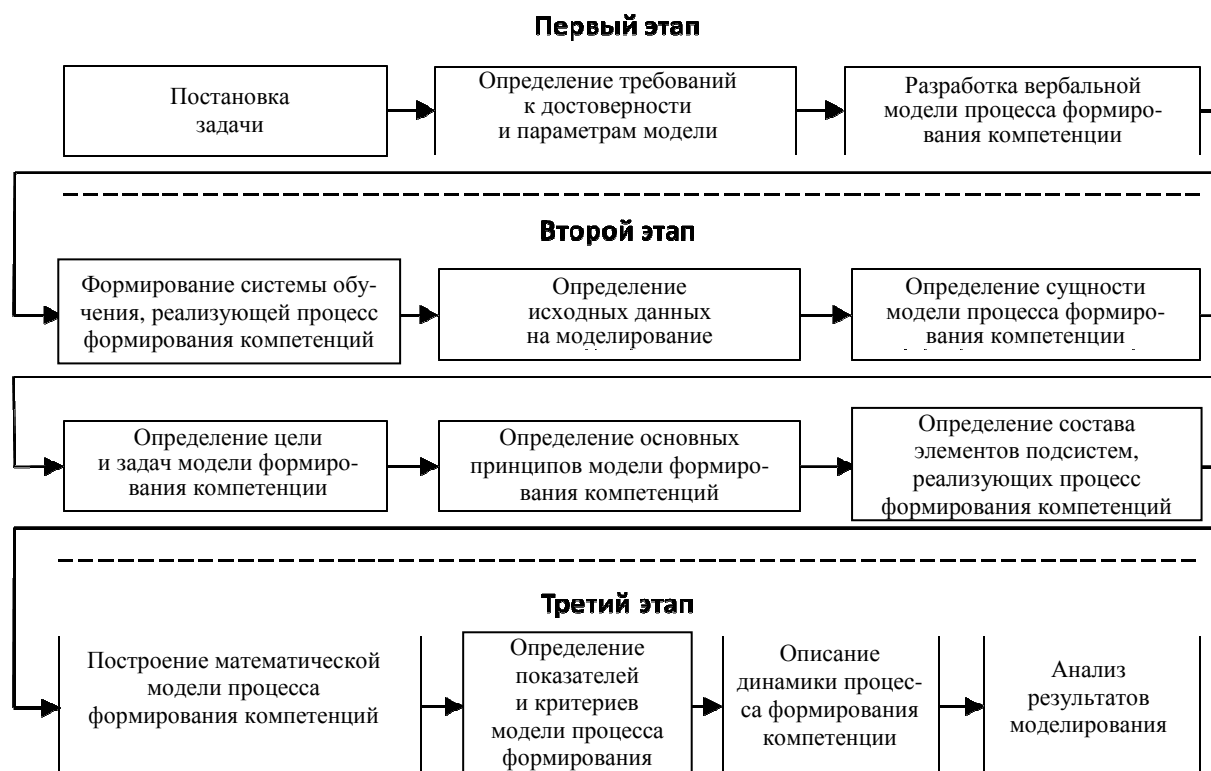


Рис. 1. Этапы разработки модели процесса формирования компетенций у выпускников военно-учебных заведений

На первом этапе разработки модели процесса формирования компетенций у выпускников вуза необходимо сформулировать общую задачу моделирования и выработать требования, предъявляемые к модели.

При этом в общую задачу моделирования с учетом современных требований могут быть включены следующие положения:

- построение рациональной системы образовательной деятельности вуза необходимо осуществлять с учетом реализации процесса формирования у них компетенций на уровне не ниже заданного;
- моделирование процесса формирования компетенций следует проводить с учетом адекватного отображения наиболее значимых свойств оригинала, соответствия целей реального и протекающего в модели процессов, простоты использования модели, позволяющей проводить расчеты на персональных компьютерах.

Таким образом, на первом этапе происходит разработка вербальной (словесной) модели формирования компетенций у выпускников, которая на следующих этапах преобразуется в математическую модель.

На втором этапе следует определить исходные данные для моделирования, а также уточнить структуру системы обучения и ее основные элементы, в которых протекает процесс формирования компетенций. На этом этапе разработчики модели должны изучить и использовать при программировании квалификационные требования, изложенные в соответствующих нормативных документах, а также определить, в соответствии с существующей структурой системы обучения, какие процессы происходят в каждом из ее элементов.

На третьем этапе разрабатывается математическая модель процесса формирования компетенций при подготовке выпускников вузов.

Для реализации рассматриваемой модели на практике необходимо в полном объеме применять методы исследования операций. В частности, при моделировании процессов форми-

рования компетенций, протекающих в системе образовательной деятельности, целесообразно применять элементы и основные положения общей теории систем, теории моделирования, общей теории управления, теории управления в системах военного назначения, теории принятия решений, теории эффективности, теории обучения и воспитания и современной дидактики.

В процессе разработки математической модели процесса формирования компетенций у выпускников военно-учебных заведений рекомендуется осуществлять следующие действия:

- в процессе моделирования принимать условия, при которых значения количественных и качественных показателей укомплектованности вузов обучающимися и научно-педагогическими работниками, элементами учебно-материальной базы, включая информационную среду [2], в интересах формирования компетенций обусловлены воздействием старшей системы и соответствуют предъявляемым требованиям. Кроме того, в качестве непереложного положения следует принимать тот факт, что формирование компетенций у обучающихся осуществляется в установленные сроки, в строгом соответствии с требованиями основных профессиональных образовательных программ (ОПОП), без учета факторов, которые могут негативно воздействовать на процесс (смены преподавателей, потери учебного времени и др.).

- дать точное развернутое определение процесса формирования компетенций в ходе подготовки выпускников вуза как цели функционирования системы образовательной деятельности вуза. Под процессом формирования компетенций в ходе подготовки выпускников вуза следует понимать комплекс совокупных упорядоченного функционирования обучающихся, преподавателей, органов управления и подразделений обеспечения в целях формирования у обучающихся требуемых компетенций на уровне не ниже заданного.

Основной целью формирования требуемых компетенций является способность выпускников выполнять должностные обязанности в соответствии с предназначением после выпуска. Успешность решения задачи формирования требуемых компетенций в рассматриваемом случае зависит от соблюдения педагогических условий, которые состоят в следующем:

- в максимальной взаимосвязи изучаемых предметных областей науки и содержания учебных дисциплин с содержанием формируемых компетенций на всех этапах их формирования;

- в соответствии организации образовательной деятельности вуза основным положениям компетентностного подхода (т. е. в применении необходимых для формирования различных элементов компетенций форм и методов обучения, а также соответствующих видов занятий).

Процесс формирования компетенций реализуется в ходе функционирования системы образовательной деятельности. Следовательно, протекание процесса формирования компетенций и его моделирование должны подчиняться основным принципам, свойственным подготовке специалистов в высшей военной школе.

Учитывая, что каждая педагогическая система организуется с учетом всех законов, присущих теории систем, моделирование необходимо осуществлять с учетом ее структуры, а также с учетом инновационных технологий в подготовке специалистов [3]. Иными словами, модель должна отражать все подсистемы и их элементы, в совокупности составляющие архитектуру моделируемой системы:

- подсистему содержания подготовки;
- подсистему процесса формирования компетенций;
- подсистему обучающихся или объектов обучения;
- подсистему обучающихся или субъектов обучения.

Для успешного моделирования рассматриваемого процесса необходимо проводить декомпозицию подсистем до элементарного состава. Однако, учитывая ограниченные цели моделирования, две последние подсистемы рассматривать не будем.

При моделировании подсистемы содержания подготовки, исходя из принципа комплексности содержания компетенций и тематики занятий, экспертным путем составляется необходи-

мый тематический план (эксперты в работе используют метод нечетких суждений). Далее полученный тематический план целесообразно разбить на учебные модули (задачи), соответствующие формируемым компетенциям [4]:

$$Z_{\phi} = \sum_{k=1}^{N_z} z_k \alpha_k, \quad (1)$$

где Z_{ϕ} – содержание подготовки при формировании конкретных компетенций, выраженное в часах;

z_k – модуль учебной информации, соответствующий содержанию формируемых компетенций;

α_k – коэффициент последовательности прохождения модулей (задач) при формировании компетенций.

Последним шагом в процедуре будет распределение всего массива информации по тематике подготовки специалистов по учебным модулям. При этом необходимо организовывать учет модулей учебной информации по конкретным учебным дисциплинам:

$$z_k = \sum_{v=1}^{S_z} e_v \mu_v, \quad (2)$$

где e_v – единица информации, соответствующая ресурсу времени, отводимому на формирование компетенции по учебной дисциплине;

μ_v – коэффициент, определяющий степень рациональности организации процесса формирования компетенций в ходе педагогической деятельности.

К изложенному добавим, что определение весовых значений коэффициентов α_k , μ_v осуществляется на основе данных экспертного опроса специалистов, имеющих соответствующий педагогический опыт. Практика оценки согласованности суждений экспертов при выявлении экспертов, мнения которых в наибольшей степени отклоняются от всех других, предполагает расчет коэффициента согласованности мнения каждого эксперта со всеми другими. Если таких менее 10%, то их оценки можно исключить и повторить расчет, а если их много, то следует осуществить замену экспертов [5].

Декомпозиция подсистемы процесса формирования компетенций проводится поэтапно в соответствии с иерархией изучаемых формирований (отделения, взвода и др.), способность к управлению которыми составляет суть формируемых компетенций. Обычно в течение учебного года формируются компетенции, соответствующие одному уровню иерархии. Весовые значения видов и методов проводимых занятий, составляющих модуль (задачу), определяются на основе экспертной оценки.

При определении последовательности изучения учебных модулей используют основной принцип педагогики «от простого к сложному»:

$$z_1 \alpha_1; \dots; z_{k-1} \alpha_{k-1}; z_k \alpha_k, \quad (3)$$

Определение ресурса времени, выделяемого для достижения уровня формирования компетенций одного модуля (задачи), происходит на основе теории наученности по выражению

$$T_{\phi} = \sum_{i=1}^{N_z} t_{z_k} m_k. \quad (4)$$

где T_{Φ} – время формирования компетенций одного модуля (задачи);
 t_{zk} – время (продолжительность) одного занятия;
 m_k – количество занятий.

Предельный уровень сформированности компетенций (Y_Q^U) стремится к единице, а требуемый – принимается равным 0,8 относительных единиц (не ниже оценки знаний на «хорошо»).

Начальный уровень – $Y_Q^H \rightarrow 0,5$.

Коэффициент γ_0 является величиной, характеризующей способность к обучению, он может быть определен из зависимости

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_1}{\ln \frac{Y_Q^{IP} - Y_Q^H}{Y_Q^{IP} - Y_Q^{\gamma_1}}}, \quad (5)$$

где γ_1 – любое текущее значение m_1 ($m_1 \neq 0$);

$Y_Q^{\gamma_1}$ – показатель, характеризующий уровень сформированности компетенций, соответствующий текущим значениям m_1 ($m_1 \neq 0$).

При необходимости определения количества занятий (по два часа) следует воспользоваться зависимостью

$$m = \gamma_0 \ln \frac{Y_Q^{IP} - Y_Q^H}{Y_Q^{IP} - Y_Q^{ТРЕБ}}, \quad (6)$$

где Y_Q^{IP} – предельный уровень сформированности компетенций;

$Y_Q^{ТРЕБ}$ – требуемый уровень сформированности компетенций;

Y_Q^H – начальный уровень сформированности компетенций;

γ_0 – коэффициент, характеризующий способность обучающихся к усвоению информации (способность к обучению).

Далее следует иметь в виду, что важными свойствами процесса формирования компетенций в ходе педагогической деятельности, определяющими его эффективность, являются своевременность, ресурсопотребление и результативность [6,7].

Своевременность характеризует эффективность функционирования системы управления образовательного учреждения при воздействии на процесс с целью достижения требуемого уровня сформированности компетенций за выделенный ресурс времени [6]. В таком случае ресурс времени, выделяемого на подготовку, можно определить из зависимости (4). При этом показатель своевременности определяется выражением

$$Y_T = 1 - \frac{\Delta T}{T_{\text{под}}^{\text{дир}}}, \quad (7)$$

где Y_T – показатель своевременности:

$T_{\text{под}}^{\text{дир}}$ – директивное время подготовки специалистов, определенное в работе [6];

$$\Delta T = T_{\text{под}}^{\text{дир}} - T_{\text{под}}. \quad (8)$$

Требованием к оперативности (своевременности) является минимальное значение $T_{\text{под}}$ по сравнению со значением $T_{\text{под}}^{\text{дир}}$. Тогда критерием оперативности (своевременности) являются значения $Y_T \leq Y_T^{\text{дир}}$.

В свою очередь, категория «результативность» может определяться как соотношение степени реализации образовательной деятельности к уровню сформированности компетенций. Она отражает полученный эффект, приводящий к требуемому результату в процессе подготовки специалистов.

Результативность подготовки специалистов должна удовлетворять следующему требованию: уровень сформированности компетенций Y_Q соответствует требуемому значению $Y_Q^{\text{треб}}$. Тогда критерий результативности подготовки специалистов должен удовлетворять требованию $Y_Q \geq Y_Q^{\text{треб}}$.

Эффективность подготовки специалистов определяется способностью выпускников выполнять функциональные обязанности в соответствии с военно-учетной специальностью. В процессе моделирования установлено, что эффективность подготовки специалистов зависит от показателей образовательной деятельности:

$$Y_{\Pi} = f(Y_T, Kn), \quad (9)$$

где Y_{Π} – эффективность подготовки специалистов.

Оценку эффективности процесса подготовки специалистов необходимо осуществлять в соответствии с правилом [8], переработав его к условиям компетентного подхода:

$$Y_{\Pi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\text{ПС}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{ПС}}$ – показатель результативности;

n – количество оцениваний требуемых профессиональных компетенций.

На рис. 2 представлена модель процесса формирования требуемых компетенций при подготовке специалистов.

Анализ выходных документов, полученных в итоге моделирования, определяет перечень основных результатов прогонов модели процесса формирования компетенций у выпускников вузов:

1. Устанавливаются сущность, цель и основная задача формирования профессиональных компетенций при подготовке специалистов в федеральных военных образовательных учреждениях высшего профессионального образования.

2. Определяются условия, соответствующие эффективному решению задачи управления процессом формирования компетенций, а именно:

- устанавливается, каким образом полный объем учебной информации необходимо делить на составные части (учебные модули, учебно-методические задачи), соответствующие формируемым компетенциям;

- определяется рациональная структура системы профессиональной деятельности, при этом организация формирования компетенций планируется исходя из ресурса отводимого учебного времени и сложности учебного материала, в соответствии с которым формируются требуемые профессиональные компетенции.

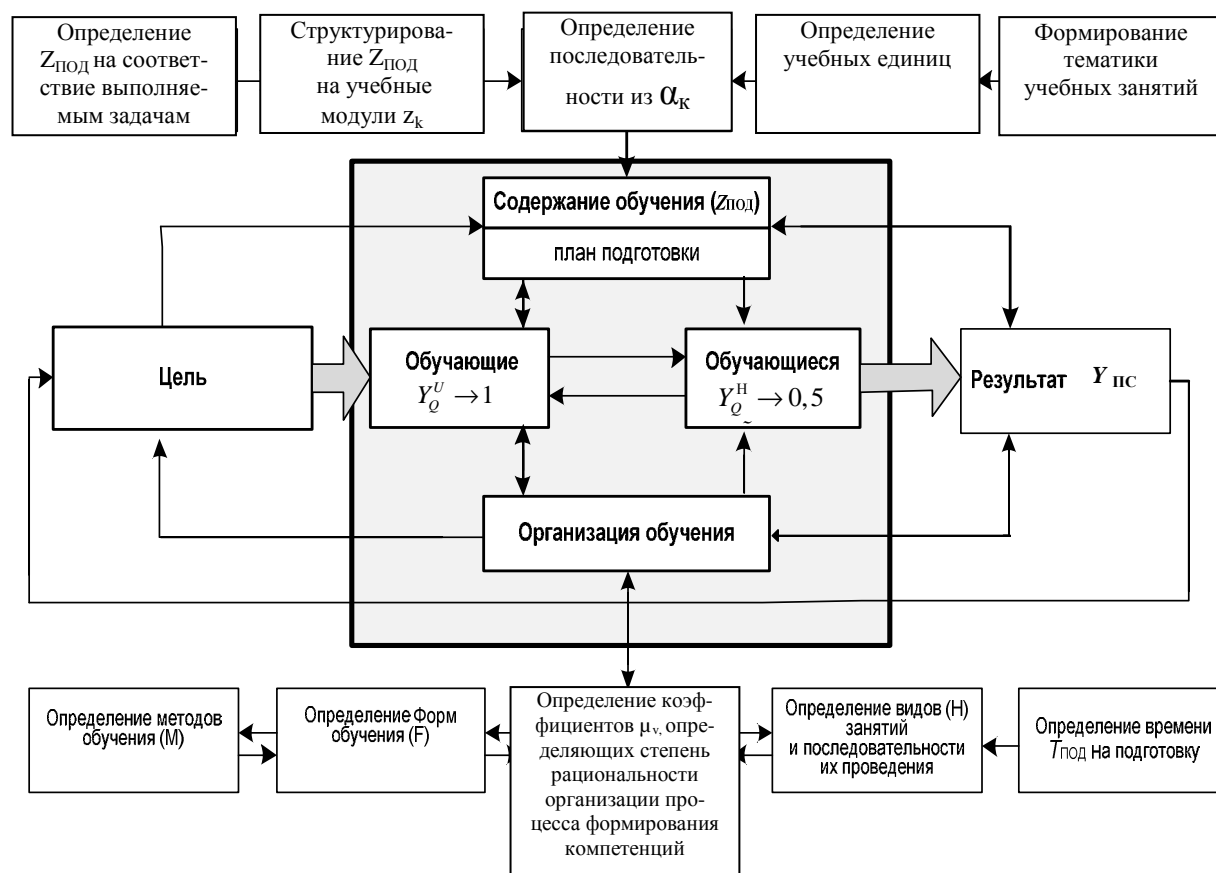


Рис. 2. Модель процесса формирования компетенций

В итоге многократного прогона модели появляется возможность рациональной организации педагогической деятельности на основе учета значительного количества факторов при условии сформированности компетенций на уровне не ниже заданного.

Список используемых источников

1. Ваягин В.Е. Теория и практика оценивания уровня сформированности военно-профессиональных компетенций у курсантов-артиллеристов при изучении тактических (тактико-специальных) дисциплин: дис. ...канд. военных наук: 20.01.06: защищена 23.06.16: утв. 24.10.16. – СПб.: МВАА, 2016. – 270 с.
2. Костюк А.В., Черных А.К. Формирование электронной образовательной среды вуза // Теоретические и прикладные вопросы образования и науки: сб. науч. тр. по материалам Междунар. научно-практ. конф. – 2014. – С. 51–54.
3. Костюк А.В., Черных А.К., Малыгина Е.А. Использование инновационных технологий в подготовке специалистов для силовых структур // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2015. – № 2 (34). – С. 134–138.
4. Современные образовательные технологии: учеб. пособие / под ред. Н.В. Бордовской. – 3-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2013. – 432 с.
5. Кунтурова Н.Б. Оценивание результативности реализации методики организации контроля формирования профессиональной компетентности военных специалистов // Изв. С-Пб. электротехн. ун-та (ЛЭТИ). – 2015. – Т.3. – С. 54–58.

6. *Боговик А.В., Игнатов В.В.* Теория управления в системах военного назначения: учеб. – СПб.: ВАС им. С.М. Буденного, 2008. – 460 с.

7. *Костюк А.В., Черных А.К.* Об оптимальном распределении временного ресурса по изучаемым темам // Теоретические и прикладные вопросы образования и науки: сб. науч. тр. по материалам Междунар. научно-практ. конф. – 2014. – С. 50–51.

8. *Барашков П.Н., Житницкий М.И., Захаров Ф.М.* Интенсификация учебно-воспитательного процесса в вузе. – Л.: ВАС им. С.М. Буденного, 1990. – 212 с.

О.В. Гуторович,
кандидат философских наук, доцент;
А.П. Ковалёв,
доктор техн. наук, профессор;
В.М. Латанов,
кандидат исторических наук, доцент

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТЕЙ КАК СОСТАВНОЙ ЧАСТИ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ СССР И РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (1981–1992)

Статья посвящена исследованию исторического опыта государственного-политического руководства становлением и развитием космических частей как новой составной части Вооруженных сил страны в сложных условиях военно-политической обстановки в мире. Повышенное внимание государственного-политического руководства страны к проблемам становления и развития космических частей в исследуемый период, по мнению авторов, в значительной мере было обусловлено не только стремлением США обеспечить господство в космосе, но и действием ряда причин, которые требуют особого рассмотрения. В статье отмечается возрастание роли космических частей в укреплении обороны страны, повышении боевой мощи Вооруженных сил.

Ключевые слова: государственное-политическое руководство, опытно-испытательная работа (ОИР), боевой расчет, дежурная смена, несение дежурства, космические аппараты (КА), Главное управление космических средств МО СССР (ГУКОС МО), Управление начальника космических средств МО СССР (УНКС МО), Научно-исследовательский испытательный полигон Министерства обороны СССР (НИИП МО СССР), Главный научно-исследовательский испытательный центр МО СССР (ГНИИЦ МО).

Актуальность проблемы определяется необходимостью изучения исторического опыта в интересах совершенствования боевой мощи Вооруженных сил РФ на основе повышения эффективности боевого применения и использования космических сил и средств в условиях значительного нарастания военно-политической напряженности в мире, активизации военизированных террористических группировок в различных регионах планеты. Особую опасность представляет стремление США к дальнейшему укреплению космических сил и средств военного назначения. В декабре 2018 года президент США Дональд Трамп издал указ о создании командования Космическими силами в структуре вооруженных сил страны. Рассмотрение некоторых причин и условий, во многом определивших в исследуемый период принятие государственно-политическим руководством СССР и РФ решений по развитию космических частей¹, на взгляд авторов, может способствовать более полному учету накопленного исторического опыта в современном строительстве.

Более того, глубокое изучение истории космических войск поможет улучшению патриотического воспитания молодежи, совершенствованию военно-политической работы с личным составом, формированию у офицерского состава и курсантов гордости и высокой ответственности за службу в космических войсках.

Исследование показывает, что процесс становления и развития космических частей в рассматриваемый период достаточно глубоко анализируется в военно-историческом труде «Военно-космические силы», разработанном по заданию Управления командующего Военно-космическими силами В.В. Фаворским и И.В. Мещеряковым [4]. В послесловии генерал-полковника В.Л. Иванова рассматриваются перспективы и проблемы дальнейшего строительства Военно-космических сил.

¹ До 1986 года – космические соединения и части МО СССР, с 1986 года – соединения и части космических средств МО СССР, с сентября 1989 года – объединения, соединения, части и учреждения Военно-космических сил Министерства обороны СССР, с 1992 года – Военно-космические силы Российской Федерации, с 2001 года – космические войска РФ. В тексте для краткости – космические части.

Некоторым проблемам истории космических частей посвящены диссертационные исследования и публикации В.В. Бурлакова, Д.А. Бочина, Н.В. Ершова, С.А. Кузьмина, В.М. Латанова, А.Н. Орлова. Достаточно широко известны воспоминания и мемуары ветеранов космических войск В.Л. Иванова, Н.М. Письменного и др. В академии подготовлены учебные пособия, в которых кратко рассматривается процесс становления и развития космических частей [8].

Вместе с тем, несмотря на обширную историографию проблемы, по-прежнему недостаточно внимания уделяется исследованию причин и условий, оказавших значительное влияние в рассматриваемый период на принятие государственно-политическим руководством страны решений по централизации космических сил и средств, дальнейшему развитию космических частей как нового рода войск центрального подчинения.

В ноябре 1981 года ЦК КПСС и Совет министров СССР приняли решение о выведении космических частей из состава Ракетных войск стратегического назначения и образовании новой составной части Вооруженных сил – Главного управления космических средств (ГУКОС МО) [10]. Общее руководство работами по применению и развитию космических средств, а также деятельностью ГУКОС МО возлагалось на Генеральный штаб Вооруженных сил СССР. ГУКОС МО было определено головной организацией Министерства обороны, отвечающей за разработку, развитие, применение и эксплуатацию образцов космического вооружения. ГУКОС МО и подведомственные ему части были подчинены непосредственно министру обороны.

В соответствии с приказом министра обороны от 10 ноября 1981 года в структуру ГУКОС МО входили [4, с. 72–73]:

- 5 научно-исследовательский испытательный полигон Министерства обороны (5 НИИП МО), два испытательных управления и пять частей запуска КА 53 научно-исследовательского испытательного полигона Министерства обороны (53 НИИП МО);
- наземный командно-измерительный комплекс – 153 Главный научно-исследовательский испытательный центр Министерства обороны (ГНИИЦ МО);
- 28 арсенал – учреждение, осуществляющее прием, ремонт, частичную сборку, хранение, выдачу частям космического назначения космического вооружения и некоторых видов космической техники;
- 50 Центральный научно-исследовательский институт космических средств (50 ЦНИИ КС) – головной центр научного обоснования перспектив и программ развития космического вооружения и техники, разработки способов применения космического вооружения в различных оперативных и стратегических ситуациях;
- Военный инженерно-космический институт имени А.Ф. Можайского – высшее военно-учебное заведение, обеспечивавшее подготовку офицерского состава для всех космических частей;
- военные представительства, обеспечивающие технический контроль за разработкой космических средств на предприятиях министерств оборонных отраслей промышленности и приемку готовой продукции.

Для выполнения возложенных задач в центральном аппарате ГУКОС МО в 1981–1982 годах были сформированы штаб, научно-технический комитет, Управление космических средств, инженерное управление и тыл.

В соответствии с приказом министра обороны СССР от 7 февраля 1986 года в интересах достижения более высокого уровня централизации руководства и сосредоточения управления войсками в руках единого командования было проведено преобразование ГУКОС МО в Управление начальника космических средств МО СССР (УНКС МО). ГУКОС МО разделяется на Управление начальника космических средств МО СССР с соответствующими подразделениями и Главное управление вооружения. Начальником космических средств МО

СССР назначается генерал-полковник А.А. Максимов², начальником Главного управления вооружения (ГУВ) – генерал-лейтенант В.В. Фаворский [4, с. 152–153].

В сентябре 1989 года были образованы объединения, соединения, части и учреждения Военно-космических сил Министерства обороны СССР.

В августе 1992 года в соответствии с указом Президента РФ от 27 июля 1992 года на основе космических сил и средств Министерства обороны Российской Федерации был создан новый род войск центрального подчинения – Военно-космические силы МО РФ (ВКС МО РФ). Командующим Военно-космическими силами был назначен генерал-полковник В.Л. Иванов [4, с. 240–241].

7 ноября 1992 года приказом министра обороны РФ было введено в действие Положение об управлении командующего Военно-космическими силами (УК ВКС). Положением УК ВКС устанавливалось, что управление командующего ВКС входит в структуру центрального аппарата МО РФ, осуществляет руководство Военно-космическими силами и несет ответственность за боеспособность и готовность ВКС к выполнению задач по предназначению [4, с. 241].

Решения советского и российского государственно-политического руководства были во многом обусловлены действием ряда причин объективного и субъективного характера. Рассмотрим их.

1. *Политика США.* В рассматриваемый период особую опасность, по мнению государственно-политического руководства Советского Союза, представляли замыслы США о распространении гонки вооружений на космос. Становилось очевидным, что США стоят на пороге качественных прорывов в создании боевых космических средств, добиваясь изменения стратегического равновесия в свою пользу. Из США поступала информация о проведении работ и о различных проектах по созданию оружия на известных и новых физических принципах (лазерного, ускорительного, СВЧ и др.) для использования его в космическом пространстве. В 1981 году было намечено начало полетов МКС «Шаттл».

Космос рассматривался американскими военными кругами как новая арена военных действий, а космические средства – как один из важнейших элементов первого удара. В 1981–1985 годах ежегодный прирост ассигнований на военный космос в США составил около 20%, а общий объем ассигнований на космическое вооружение предусматривался в сумме 60 млрд. долларов. С 1982 года расходы США на военную космическую деятельность стали намного превосходить средства, выделяемые на гражданские космические программы. 1 сентября 1982 года в США было создано специальное Космическое командование с широкими полномочиями для управления военными космическими средствами. Директива президента США Р. Рейгана от 4 июля 1982 года о национальной политике в освоении космоса и создание Космического командования определяли пути использования космического пространства как новой сферы вооруженной борьбы – особого театра военных действий (ТВД). Основное направление космической программы США определялось стремлением создать системы оружия космического базирования, с помощью которых могло бы быть достигнуто завоевание полного господства в космосе. В американских средствах массовой информации отмечалось: «Тот, кто сумеет захватить контроль над космосом – этой главной ареной будущих войн, сможет решающим образом изменить соотношение сил, что будет равноценно установлению мирового господства» [4, с. 87].

В целом на военно-космические программы к 2000 году США планировало израсходовать 95 млрд. долларов. Ориентировочная стоимость намеченной США программы «звездных войн» должна была составить от 500 млрд. до 2 трлн. долларов [5, с. 71].

² Генерал-полковник А.А. Максимов – лауреат Ленинской и Государственной премий, в 1979 году был назначен начальником Главного управления космических средств Министерства обороны СССР (ГУКОС МО СССР). – См. Н.М. Письменный. – URL: <http://cosmosinter.ru/articles/history/detail.php?ID=2730> (дата обращения: 12.09.2018).

2. *Наш ответ.* Напряженная международная и военно-политическая обстановка требовала от государственно-политического руководства страны усилить поиск предупредительных мер возможного противодействия угрозам в космосе и из космоса. Новой целью в освоении и использовании космического пространства в интересах обороны страны в ближайшие 10–15 лет становилось активное противодействие устремлениям Вашингтона к завоеванию господства в космосе. Программа развития вооружения и военной техники СССР на 1986–1995 годы предусматривала достижение паритета и недопущение превосходства США в использовании космического пространства в военных целях. По мнению советских военных экспертов, освоение космического пространства как новой сферы вооруженной борьбы позволяло вести военные действия (если к этому вынудит противник), наиболее соответствующие глобальному характеру современной войны, решать задачи обеспечения боевой деятельности Вооруженных сил на качественно новом уровне, недостижимом для традиционных средств. Уже к началу 1982 года состоявшие на вооружении космические средства боевого и специального назначения обеспечивали [4, с. 66]:

- выявление 80–90% всех военных объектов с определением их координат;
- возможность заблаговременного перевода Вооруженных сил в требуемую степень боевой готовности;
- осуществление оперативного контроля развития кризисных ситуаций в различных районах мира;
- повышение эффективности нанесения ударов огневými средствами РВСН, ВВС и ВМФ на 40–50 %.

Исследование показывает, что принятию решений советского государственно-политического руководства по развитию космических средств, организационному укреплению космических частей способствовало успешное выполнение целого ряда программ военно-космического назначения. К 1982 году в основном были завершены программы создания, принятия на вооружение и совершенствования космических средств второго поколения: «Янтарь», «Целина», «Пирс», «Цикада», «Молния», «Радуга», «Метеор», «Тайфун» и др. Продолжались производство и эксплуатация комплексов первого поколения «Зенит». На вооружение был принят новый, прошедший летные испытания космический комплекс высокодетального наблюдения «Янтарь-4К». В последующем военнослужащие космических частей проводили испытания новейших ракетно-космических систем «Энергия» – «Буран», «Мир», «Салют», «Союз», «Прогресс», «Грань», «Горизонт», «Облик», «Янтарь» и др. На космодроме Байконур в мае 1987 и в ноябре 1988 года успешно прошли испытания новой универсальной ракетно-космической системы «Энергия» – «Буран». Были приняты на вооружение восемь новых космических комплексов, ракета-носитель «Циклон-3», введены в строй новые технические и стартовые комплексы, автоматизированная система управления КА и др.

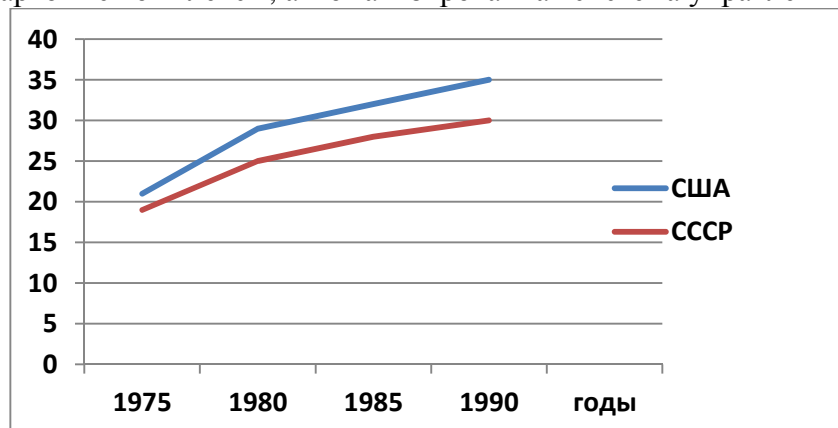


Рис. 1. Рост количества находившихся в оперативном использовании военно-космических комплексов и систем СССР и США [5, с. 273]

13 февраля 1981 года на расширенном совещании начальник ГУКОС генерал-полковник А.А. Максимов говорил о завершении перехода развития космических средств от применения одиночных спутников и отдельных систем, решавших ограниченный круг задач, к созданию постоянно действующих единых космических систем самого различного оперативного предназначения в любых условиях стратегической обстановки. В июле – августе 1981 года был утвержден пятилетний план опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ по развитию космических сил и средств [4, с. 77].

В интересах поддержания стратегического паритета с США в СССР в исследуемый период почти в два раза возросло количество находившихся в оперативном использовании военно-космических комплексов и систем (рис. 1).

3. *Сложности решаемых задач.* Развитие космических средств сопровождалось значительным возрастанием и усложнением задач, возложенных на космические части. Выступая перед активом 153 ГНИИЦ МО в феврале 1984 года, начальник космических средств МО СССР генерал-полковник А.А. Максимов, подчеркивал: «Сегодня, когда президент США Рейган открыто ведет подготовку к "звездным войнам", мы не можем оставаться только инженерами, мы должны быть воюющими командирами, овладевать оперативным искусством проведения боевых операций и сражений в космосе, из космоса, вопросами обороны и нападения в космосе, маневрирования, обеспечения выполнения боевой задачи в любых сложных условиях» [6, с. 25].

Исследуемый период отмечается нарастанием объема ОИР в частях запуска КА и интенсивности сеансов управления КА в частях управления КА.

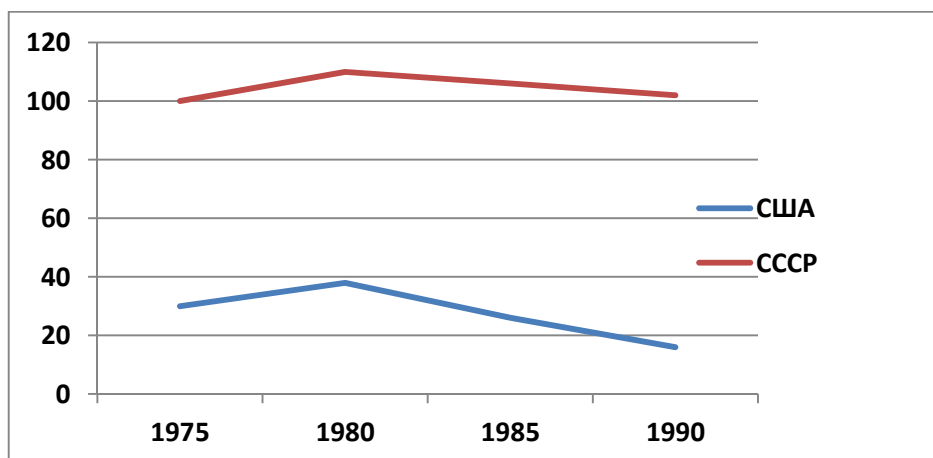


Рис.2. Общее количество запусков ракет-носителей космических аппаратов в год СССР и США

Части запуска КА 5 и 53 НИИП МО ежегодно проводили более 100 запусков КА, что значительно превышало количество аналогичных запусков в США (рис. 2). С 1982 по 1989 годы боевые расчеты полигонов осуществили запуски свыше 1100 КА [4, с. 278–279].

Анализ роста интенсивности сеансов управления КА в частях КИК в 1982–1990 годах представлен в табл. 1 [8].

Таблица 1

Анализ роста интенсивности сеансов управления КА в частях КИК в 1982–1990 годах

Количество сеансов управления КА в частях	Отдельные научно-испытательные пункты (ОНИП) и годы								
	ОНИП-19			ОНИП-15			ОНИП-14		
	1983	1985	1988	1982	1986	1990	1982	1985	1988
	1049	1521	2876	2471	13291	20150	3125	12153	15102

В целом личным составом дежурных смен 153 ГНИИЦ МО в 1982–1988 годах осуществлялось управление 1562 КА, среди которых более 80% были военного назначения [3, с. 25]. В 1990 году специалистами командно-измерительного комплекса было выполнено 320 736 сеансов управления с 269 космическими аппаратами, тогда как в 1985 году специалисты управляли 245 объектами и провели 245 168 сеансов управления с ним [3, с. 26].

4. *Разнообразие и сложность социально-экономических, экологических, общественно-политических условий в регионах дислокации частей.* С развитием космического вооружения, возрастанием объема и усложнением возложенных на космические части задач шел процесс их количественного и качественного преобразования. Следует отметить, что к 1982 году сложилась достаточно развитая наземная инфраструктура ГУКОС МО, включавшая космические части научно-исследовательских испытательных полигонов и наземного командно-измерительного комплекса, арсенал, научно-исследовательский институт, Военный инженерно-космический институт имени А.Ф. Можайского и военные представительства.

Боевые порядки космических частей располагались на территории 12 союзных республик, 36 краев и областей, 11 военных округов. Подразделения и части отдельного морского командно-измерительного комплекса (ОМКИК), входящие в состав 153 ГНИИЦ МО, выполняли задачи в морях Тихого, Атлантического и Индийского океанов во главе с флагманом советского научного флота – научно-измерительным судном (НИС) «Космонавт Юрий Гагарин». Более 70% частей дислоцировались в районах с суровыми климатическими условиями, на значительном удалении от крупных промышленных и культурных центров [6, с. 31].

Регионы дислокации космических частей отличались сложной идеологической, криминальной и экологической обстановкой, а также достаточно тяжелыми социально-бытовыми условиями. В период 1985–1988 годов участились случаи националистических выступлений в районах расположения космических частей в Казахстане, Узбекистане, Грузии, Эстонии, Бурятской автономной республике. В Плесецком районе (район дислокации 53 НИИП МО) было размещено около 20 лагерей заключенных. Около 20% жителей района были осуждены, в том числе за пособничество гитлеровской Германии. В Кызыл-Ординской области, где располагался космодром «Байконур», проживало около 147 тыс. немцев и выходцев из Китая [6, с. 32–33].

Серьезную озабоченность советского руководства вызвал процесс ухудшения экологической обстановки в районе Аральского моря, на восточном побережье которого вдоль реки Сыр-Дарья располагался космодром «Байконур». Предлагалось объявить зону Аральского моря зоной экологического бедствия и срочно определить чрезвычайные меры по его ликвидации [1, с. 14].

Кроме того, в космических частях наблюдалось значительное отставание социальной сферы от реально необходимых потребностей в ее развитии. В 1987 году около 30% офицеров космических частей не имели квартир, на 20–25 % были перегружены офицерские общежития, остро стояли вопросы о детских дошкольных учреждениях и трудоустройстве жен офицеров. Тяжелое положение сложилось на 5 НИИП МО (космодром «Байконур»), где общая численность населения на 1 января 1987 года (150 тыс. чел) в 30 раз превышала расчетную численность населения при создании полигона [6, с. 33–35].

5. *Межведомственные противоречия.* К началу 1980 года объективно сложились условия, требовавшие дальнейшего преобразования организационной структуры космических частей с введением самостоятельного центрального командования. К этому времени ГУКОС МО стал единственным органом Министерства обороны, централизованно осуществляющим практически все работы по космической тематике и обеспечивающим исследования перспектив развития, разработку и серийное производство на предприятиях промышленности космических средств вооружения и их применение по планам Генерального штаба. ГУКОС МО выполнял многочисленные работы в интересах науки, народного хозяйства и международного сотрудничества.

11 июля 1981 года вопрос о перспективах развития космических сил и средств стал предметом обсуждения на коллегии Министерства обороны. Были подготовлены предложения

министру обороны по сосредоточению руководства разработкой и заказами космических средств, а также управления орбитальной группировкой КА в одном органе Министерства обороны – ГУКОС. Предложения коллегии были положены в основу приказа министра обороны от 10 ноября 1981 года о выведении космических частей из состава РВСН. ГУКОС МО впервые определялось головной организацией Министерства обороны, отвечающей за разработку, развитие, применение и эксплуатацию космического вооружения [4, с. 69].

Однако исследование свидетельствует, что были неоднократные попытки оспорить принятые решения. Борьба за роль, место и подчиненность военных космических средств в Министерстве обороны предстояла долгая и упорная. Результаты ее во многом зависели от решительных и продуманных действий командования ГУКОС МО. Руководство ГУКОС во главе с генерал-полковником А.А. Максимовым и научные силы во главе с 50 ЦНИИ, руководствуясь принципами военной науки и учитывая сложившуюся структуру военно-космической деятельности, утверждали на всех уровнях концепцию самостоятельного формирования Военно-космических сил [7].

По воспоминаниям бывшего министра общего машиностроения СССР О.Д. Бакланова реальная угроза над ГУКОС нависла в 1985 году, когда четыре главкома – РВСН, ВВС, ПВО, ВМФ – подписали письмо о необходимости фактического раздела ГУКОС. РВСН готовы были взять на себя запуск космических аппаратов, подчинить себе все космодромы, ПВО – орбитальную группировку, за исключением космических аппаратов, обеспечивающих Военно-морской флот, а ВВС – центр подготовки космонавтов и в перспективе авиационно-космические системы [2].

Начальник ГУКОС А.А. Максимов в своих записках в ЦК КПСС и Министерство обороны СССР, основываясь на отечественных научных разработках и зарубежном опыте, настойчиво утверждал, что попытки включить военное освоение космического пространства в один из существующих видов Вооруженных сил являются ошибочными. Космос – новая сфера вооруженной борьбы, а в перспективе – особый театр военных действий, где уже развернуты группировки космических аппаратов. Здесь действуют свои физико-географические особенности, которыми пренебречь нельзя, как нельзя разрывать управление космической группировкой между различными видами или родами войск [7].

Ветеран космических войск генерал-майора авиации В.В. Кажарский вспоминал, что концепцию, изложенную в записках А.А. Максимова руководству ГУКОС, а затем и космических средств, пришлось отстаивать неоднократно. Окончательно эта концепция утвердилась в начале 1990-х годов, когда Управление начальника космических средств МО СССР возглавил генерал-полковник В.Л. Иванов. Предложения о создании космических войск обсуждались в Генеральном штабе. В результате был создан новый род войск центрального подчинения – Военно-космические силы МО РФ [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в исследуемый период советское, а затем российское государственно-политическое руководство принимает ряд неотложных мер по обеспечению динамичного развития и организационного укрепления космических частей. Результатом принятых мер стало выведение ГУКОС МО из состава РВСН, образование Военно-космических сил Министерства обороны СССР, а после развала Советского Союза – создание нового рода войск центрального подчинения – Военно-космических сил МО РФ.

Ускоренного развития военно-космической составляющей Вооруженных сил страны требовали сложная и противоречивая военно-политическая обстановка, стремление США к форсированному освоению космического пространства как новой сферы вооруженной борьбы и обеспечению полного превосходства в космосе. Возросла роль космических частей в укреплении обороны страны, боевом обеспечении всех видов и родов Вооруженных сил.

Требовалось неотложное решение целого ряда серьезных проблем, вызванных особенностями дислокации космических частей, идеологическими, социально-бытовыми, климатическими и экологическими условиями жизни и деятельности военнослужащих и их семей. Значительная работа по организационно-техническому развитию и укреплению космических частей была проделана под руководством генерал-полковника А.А. Максимова и первого командующего Военно-космическими силами России генерал-полковника В.Л. Иванова.

Список используемых источников

1. Ауельбеков Е.Н. Единственно возможная привилегия // Коммунист. – 1988. – № 11. – С.10–16.
2. Бакланов О.Д. Космос моя судьба. – М.: Общество сохранения литературного наследия, 2016. – Т. 3. – 121 с. – URL: <https://www.labyrinth.ru/books/589149/> (дата обращения: 12.09.2018).
3. Бочинин Д.А. Подготовка специалистов по управлению космическими аппаратами в Вооруженных силах СССР накануне и в годы перестройки (1982–1991): автореф. дис. на соискание ученой степени канд. ист. наук. – СПб., 2008. – 30 с.
4. Военно-космические силы. Становление Военно-космических сил. – М., 1998. – Кн. II. – 430 с.
5. Громыко А.А., Ломейко В.Б. Новое мышление в ядерный век. – М.: Международные отношения, 1984. – 292 с.
6. Латанов В.М. Партийное руководство деятельностью командиров, политорганов и партийных организаций соединений и частей космических средств МО СССР по укреплению воинской дисциплины (1982–1989): дис. ...канд. ист. наук. – М., 1990. – 163 с.
7. Свириг С.А., Симановский Р.В., Ушаков В.В. История создания и развития Военно-космических сил Российской Федерации: учеб. пособие / под ред. В.Н. Кузьмина. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1998. – 96 с.
8. Создание Военно-космических сил – торжество советской военной науки. – URL: <http://cosmosinter.ru/articles/history/detail.php?ID=1708> (дата обращения: 12.09.2018).
9. ЦАМО. – Ф. 1555. – Инв. 939110. – Д. 244. – Л. 41; архив войсковой части 55576. – Д. 31. – Л. 269.

Н.В. Селихина,
кандидат военных наук;
С.С. Терещук
Военная прокуратура Центрального военного округа

ЮРИДИЧЕСКАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ ЗА НЕПРИНЯТИЕ МЕР ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ И УРЕГУЛИРОВАНИЮ КОНФЛИКТА ИНТЕРЕСОВ (ПРОБЛЕМЫ И ПРОТИВОРЕЧИЯ ПРАВОПРИМЕНЕНИЯ)

В статье проведен комплексный анализ правовых норм, регламентирующих применение к военнослужащим взысканий за непринятие мер по предотвращению и урегулированию конфликта интересов. Выделены особенности взысканий за совершение коррупционных правонарушений. Сформулированы предложения по внесению изменений в антикоррупционное законодательство.

Ключевые слова: военнослужащие, конфликт интересов, ответственность, увольнение в связи с утратой доверия, совершенствование антикоррупционного законодательства.

В соответствии с федеральным законом «О противодействии коррупции» одним из основных элементов противодействия коррупции является профилактика, под которой понимается деятельность органов государственной власти, органов местного самоуправления, организаций, физических лиц в пределах своих полномочий по предупреждению коррупции, выявлению и устранению причин коррупции.

Вопросы профилактики коррупции хорошо изложены в исследованиях А.Л. Юсупова, который указывает, что меры, направленные на профилактику коррупции, не являясь реакцией государства на коррупционное поведение, применяются на «дальних подступах» к коррупционной деятельности, не позволяя отдельным незаконным проявлениям в деятельности государственных служащих перерасти в коррупционные преступления [1].

Введение института урегулирования конфликта интересов на государственной и муниципальной службе предопределено наряду с прочими факторами и международными обязательствами России, вытекающими из Конвенции ООН против коррупции, согласно пункту 4 статьи 7 которой каждое государство-участник стремится, в соответствии с основополагающими принципами своего внутреннего законодательства, создавать, поддерживать и укреплять такие системы, какие способствуют прозрачности и предупреждают возникновение коллизии интересов [2, 3].

Впервые в Российской Федерации понятие конфликта интересов на государственной гражданской службе сформулировано в статье 19 федерального закона от 27 июля 2004 г. №79-ФЗ «О государственной гражданской службе Российской Федерации» как ситуация, при которой личная заинтересованность гражданского служащего влияет или может повлиять на объективное исполнение им должностных обязанностей и возникает или может возникнуть противоречие между личной заинтересованностью служащего и законными интересами граждан, организаций, общества, субъекта Российской Федерации или Российской Федерации, способное привести к причинению вреда этим законным интересам [4].

Аналогичное определение конфликта интересов на государственной службе содержалось в федеральном законе от 25 декабря 2008 г. № 273-ФЗ «О противодействии коррупции». Действие норм данного закона, связанных с соблюдением государственными служащими заповедей и ограничений, требований к служебному поведению и урегулированию конфликта интересов, распространено на все виды государственной службы, в том числе и военную [5].

Актуальное определение конфликта интересов, а также порядка его предотвращения и урегулирования дано в новой редакции федерального закона «О противодействии коррупции».

В настоящее время под конфликтом интересов понимается ситуация, при которой личная заинтересованность лица, замещающего должность, замещение которой предусматривает обязанность принимать меры по предотвращению и урегулированию конфликта интересов, влияет или может повлиять на надлежащее, объективное и беспристрастное исполнение им должностных обязанностей, а под личной заинтересованностью – получение доходов в виде денег, иного имущества, в том числе имущественных прав, услуг имущественного характера, результатов выполненных работ или каких-либо выгод (преимуществ) лицом, замещающим должность, замещение которой предусматривает обязанность принимать меры по предотвращению и урегулированию конфликта интересов, и (или) состоящими с ним в близком родстве или свойстве лицами (родителями, супругами, детьми, братьями, сестрами, а также братьями, сестрами, родителями, детьми супругов и супругами детей) [6].

Законодательством закреплено три признака конфликта интересов:

- личная заинтересованность;
- влияние личной заинтересованности на надлежащее, объективное и беспристрастное исполнение лицом служебных обязанностей;
- наличие должности, предусматривающей обязанность принимать меры по предотвращению и урегулированию конфликта интересов.

Из определения конфликта интересов исключены признаки возникновения противоречия между личной заинтересованностью должностного лица и правами, законными интересами граждан, организаций, общества или государства, а также способность этого противоречия привести к причинению вреда.

Особенностью понятия конфликта интересов стало появление такого признака, как наличие у должностного лица обязанности принимать меры по предотвращению и урегулированию конфликта интересов. Если личная заинтересованность лица и ее влияние на надлежащее, объективное и беспристрастное исполнение им служебных обязанностей зависят от самого лица, то наличие должности – объективное обстоятельство.

Таким образом, в качестве конфликта интересов необходимо учитывать ряд факторов:

- конфликт интересов зависит от должности, замещение которой предусматривает обязанность принимать меры по предотвращению и урегулированию конфликта интересов. Это позволяет сделать вывод об ограничении круга лиц, на которых распространяется обязанность принимать меры по предотвращению и урегулированию конфликта. В данном случае понятие конфликта интересов напрямую поставлено законодателем в зависимость от соответствующей должности;
- личная заинтересованность должностного лица, «влияет или может повлиять на надлежащее, объективное и беспристрастное исполнение им служебных обязанностей» и может быть не только прямой, но и косвенной;
- профилактический характер конфликта интересов состоит в том, что личная заинтересованность – это не получение доходов, а только возможность их получения;
- расширен перечень объектов, возможность получения которых приводит к возникновению конфликта интересов. Помимо «доходов в виде денег, иного имущества к ним отнесены результаты выполненных работ, а также какие-либо выгоды (преимущества);
- федеральным законом «О противодействии коррупции» определен круг лиц, которые могут быть причастны к возникновению конфликта интересов. К конфликту интересов может привести возможность получения доходов, выгод (преимуществ) не только самим должностным лицом, но и (или) его близкими родственниками, лицами или организациями, с которыми оно связано имущественными отношениями.

Порядок предотвращения и урегулирования конфликта интересов заключается в том, что военнослужащий, замещающий должность, замещение которой предусматривает обязанность принимать меры по предотвращению и урегулированию конфликта интересов, обязан принимать меры по недопущению любой возможности возникновения конфликта интересов, а также уведомлять в письменной форме своего непосредственного командира (начальника) о возникшем конфликте интересов или о возможности его возникновения, как только ему станет об этом известно [7].

Предотвращение или урегулирование конфликта интересов со стороны военнослужащего осуществляется путем его самоотвода или отказа от выгоды, явившейся причиной конфликта интересов, а со стороны представителя нанимателя – путем отвода, изменения должностного или служебного положения служащего, являющегося стороной конфликта, вплоть до его отстранения от исполнения служебных обязанностей.

Законодателем предусмотрена юридическая ответственность за непринятие военнослужащим, являющимся стороной конфликта интересов, мер по предотвращению или урегулированию конфликта интересов в виде увольнения в соответствии с законодательством Российской Федерации.

В частности, подпунктом «д1» пункта 1 статьи 51 федерального закона «О воинской обязанности и военной службе» от 28 марта 1998 г. № 53-ФЗ предусмотрено, что в случае непринятия военнослужащим мер по предотвращению и (или) урегулированию конфликта интересов, стороной которого он является, последний подлежит увольнению с военной службы в связи с утратой доверия со стороны должностного лица, имеющего право принимать решение о его увольнении [8]. Этим же законом на командира (начальника) возлагается ответственность за непринятие мер по предотвращению и урегулированию конфликта интересов, возникшего у подчиненного ему военнослужащего, в случае, если ему стало известно о возникновении такого конфликта. В данном случае командир (начальник) подлежит досрочному увольнению с военной службы в связи с утратой доверия.

Таким образом, если совершенное военнослужащим деяние будет квалифицировано как конфликт интересов, то независимо от его заслуг и тяжести последствий применяется единственно возможное взыскание в виде досрочного увольнения с военной службы в связи с утратой доверия, которое должно быть применено не позднее шести месяцев со дня поступления информации о совершении военнослужащим коррупционного правонарушения и не позднее трех лет со дня его совершения.

Взыскания за коррупционные правонарушения применяются не на основании заключения о результатах разбирательства, проведенного назначенным для этого лицом, а на основании доклада о результатах проверки, проведенной подразделением кадровых органов о профилактике коррупционных и иных правонарушений.

С учетом изложенного необходимо более детально исследовать порядок проведения подразделениями кадровых органов проверок соблюдения военнослужащими требований к служебному поведению, а также порядок рассмотрения аттестационными комиссиями докладов о результатах проверок.

Правовую основу осуществления проверок соблюдения военнослужащими требований к служебному поведению составляет Положение о проверке достоверности и полноты сведений, представляемых гражданами, претендующими на замещение должностей федеральной государственной службы, и федеральными государственными служащими, и соблюдения федеральными государственными служащими требований к служебному поведению, утвержденное указом Президента Российской Федерации от 21 сентября 2009 г. № 1065 (далее – Положение о проверке) [9].

Проверка осуществляется по решению руководителя федерального государственного органа или должностного лица, которому такие полномочия предоставлены руководителем соответствующего федерального государственного органа (в том числе должностных лиц,

временно исполняющих их обязанности). По результатам проверки решение принимается в письменной форме персонально в отношении каждого военнослужащего.

Проверка осуществляется исключительно кадровыми службами федеральных государственных органов и территориальных органов федеральных государственных органов, кроме федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих оперативно-розыскную деятельность. Проведение проверок непосредственными начальниками военнослужащих или сотрудниками иных подразделений не правомерно.

Проверка проводится на основании информации, представляемой в письменном виде в установленном порядке должностными лицами кадровых служб федеральных государственных органов.

Срок проведения проверки со дня принятия решения о ее проведении не должен превышать 60 дней, однако может быть продлен должностным лицом, принявшим решение о ее проведении, до 90 дней.

Военнослужащий, в отношении которого проводится проверка, уведомляется о начале проверки в течение двух рабочих дней со дня получения соответствующего решения и информируется руководителем соответствующей кадровой службы о том, какие сведения, представляемые им, подлежат проверке.

В ходе проведения проверки изучаются представленные военнослужащим сведения о доходах, об имуществе и обязательствах имущественного характера и дополнительные материалы, проводятся беседы, направляются в установленном порядке запросы в государственные органы и иные организации, осуществляется анализ представленных военнослужащим сведений.

По окончании проверки военнослужащему вручается уведомление, содержащее положения законодательства, которые им нарушены, а должностному лицу, уполномоченному назначать военнослужащего на должность, представляется доклад, по результатам которого принимается одно из следующих решений:

- применить к военнослужащему меры юридической ответственности;
- представить материалы проверки в соответствующую аттестационную комиссию.

Материалы антикоррупционной проверки представляются председателю аттестационной комиссии, который не позднее 20 дней с момента поступления доклада назначает дату заседания комиссии и организует ознакомление военнослужащего, в отношении которого комиссией рассматривается вопрос о соблюдении требований к служебному поведению и (или) требований об урегулировании конфликта интересов, его представителя, членов комиссии и других лиц, участвующих в заседании комиссии, с докладом и результатами проверки.

По итогам заседания комиссии в отношении военнослужащего принимается одно из следующих решений:

- военнослужащий соблюдал требования к служебному поведению и (или) требования об урегулировании конфликта интересов;
- военнослужащий не соблюдал требования к служебному поведению и (или) требования об урегулировании конфликта интересов. В этом случае комиссия рекомендует руководителю органа военного управления указать военнослужащему на недопустимость нарушения требований к служебному поведению и (или) требований об урегулировании конфликта интересов либо применить к государственному служащему конкретную меру ответственности.

Таким образом, если аттестационная комиссия подтвердит факт несоблюдения военнослужащим, являющимся стороной конфликта интересов, мер по предотвращению или урегулированию конфликта интересов, но с учетом всех исследованных материалов и обстоятельств сочтет данное правонарушение малозначительным, она вправе рекомендовать руководителю органа военного управления указать военнослужащему на недопустимость нарушения требований об урегулировании конфликта интересов.

В настоящее время указанная рекомендация не может быть реализована, так как федеральным законом «О противодействии коррупции» за коррупционное правонарушение предусмотрено только увольнение с военной службы в связи с утратой доверия.

Вышеназванная ситуация не отвечает требованиям статьи 28 федерального закона «О статусе военнослужащих», согласно которой военнослужащий привлекается к юридической ответственности в зависимости от характера и тяжести совершенного им правонарушения [11].

В пункте 12 Обзора практики рассмотрения военными судами дел о применении взысканий за коррупционные правонарушения, предусмотренные федеральным законом «О воинской обязанности и военной службе», утвержденного Президиумом Верховного суда Российской Федерации 4 октября 2017 г., изложена аналогичная позиция [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных правовых норм, регламентирующих ответственность военнослужащих за непринятие мер по предотвращению и урегулированию конфликта интересов, свидетельствует об их несовершенстве и противоречивости.

В целях повышения эффективности мер юридической ответственности за коррупционные проступки необходимо внести ряд изменений в федеральные законы:

1. Часть 6 статьи 11 федерального закона «О противодействии коррупции» изложить в следующей редакции: «Непринятие лицом, указанным в части 1 статьи 10 настоящего федерального закона, являющимся стороной конфликта интересов, мер по предотвращению или урегулированию конфликта интересов, является правонарушением, влекущим увольнение указанного лица либо привлечение его к иным видам ответственности в соответствии с законодательством Российской Федерации».

2. Исключить подпункты «д1» и «д2» из части 1 статьи 51 федерального закона «О воинской обязанности и военной службе» и включить их в часть 2 статьи 51 названного федерального закона.

Список используемых источников

1. Юсупов А.Л. Дисциплинарная ответственность за нарушения законодательства о противодействии коррупции: дис. ... канд. юрид. наук:12.00.14: защищена 06.10.14. – Саратов, 2014. – 204 с.

2. Кудашкин А.В., Козлов Т.Л. Порядок регулирования конфликта интересов нуждается в совершенствовании. – URL: http://www.juristlib.ru/book_10071.html (дата обращения: 08.02.2019).

3. Конвенция Организации Объединенных Наций против коррупции (принята Генеральной Ассамблеей ООН 31.10.2003) // Собр. законодательства Российской Федерации. – 2006. – № 26, ст. 2780.

4. Российская Федерация. Законы. О государственной гражданской службе Российской Федерации: федеральный закон // Рос. газ. – 2004. – 31 июля.

5. Российская Федерация. Законы. О противодействии коррупции: федеральный закон // Рос. газ. – 2008. – 30 дек.

6. Российская Федерация. Законы. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части установления обязанности лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц сообщать о возникновении личной заинтересованности, которая приводит или может привести к конфликту интересов, и принимать меры по предотвращению или урегулированию конфликта интересов: федеральный закон // Рос. газ. – 2015. – 9 окт.

7. Об утверждении Порядка уведомления военнослужащими Вооруженных Сил Российской Федерации о возникновении личной заинтересованности при исполнении должностных обязанностей, которая приводит или может привести к конфликту интересов: приказ министра обороны РФ от 02.06.2016 № 321. – URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 08.02.2019).

8. Российская Федерация. Законы. О воинской обязанности и военной службе: федеральный закон // Рос. газ. – 1998. – 2 апр.

9. О проверке достоверности и полноты сведений, представляемых гражданами, претендующими на замещение должностей федеральной государственной службы, и федеральными государственными служащими, и соблюдения федеральными государственными служащими требований к служебному поведению: указ Президента РФ от 21.09.2009 № 1065 // Рос. газ. – 2009. – 22 сент.

10. О комиссиях по соблюдению требований к служебному поведению федеральных государственных служащих и урегулированию конфликта интересов: указ Президента РФ от 01.07.2010 № 821 // Рос. газ. – 2010. – 7 июля.

11. Российская Федерация. Законы. О статусе военнослужащих: федеральный закон // Рос. газ. – 1998. – 2 июня.

12. Обзор практики рассмотрения военными судами дел о применении взысканий за коррупционные правонарушения, предусмотренные федеральным законом «О воинской обязанности и военной службе». – URL: <http://www.voennoepravo.ru/node/6784> (дата обращения: 15.02.2019).

Avksentyev A.A., Ivanov A.O., Isupov N.A. Method of guidance calculation for spacecraft approaching to orbital object during minimal number of orbital turns // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 8–15.

The method is intended for the calculation of the guidance, which is providing spacecraft to approach the orbital object when they move in vicinity of the same circular orbit. At the initial moment the spacecraft and the orbital object are on significant distance from each other. At first the impulse of speed provides approaching through minimally possible number of orbital turns is calculated. Then it is used for movement parameters calculation at a normal gravitation field and interval work of the jet engine. Opportunities of slip reduction by means of the created short-range guidance are investigated.

Key words: spacecraft, orbital object, approaching, circular orbit, integer orbital turns.

Method of analytical estimation of precision guidance of the spacecraft-robot at the iterative terminal control under the action of random disturbances / V.V. Burmistrov, M.Y. Zotkin, M.M. Makarov, V.I. Mironov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 16–25.

Presents a method for analytical evaluation of the pointing accuracy of the spacecraft-robot at the iteration terminal management in the context of random perturbations and the calculation results of the effect of interval τ duration on the probability characteristics of the accuracy of the spacecraft-robot. On the basis of the data obtained, recommendations on the choice of the interval τ duration depending on the requirements of precision guidance are presents.

Key words: spacecraft-robot, the iteration terminal control, pointing accuracy.

Dzhumkov V.V., Petushkov A.M., Cherniy S.E. Methodical approach to estimation of Defense Department research and development organizations scientific activities efficiency // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 26–34.

There is justify the necessity of improving scientific-methodical approach to estimation of Defense Department research and development organizations scientific activities efficiency. The main features of the studied subject area are considered. The efficiency scientific activity indicator hierarchical system is offered. Analyzed the possibilities of visualization and interpretation evaluation for scientific activity estimation efficiency results by indicators of different levels. Also formulated proposals for development and use appropriate methodical approach for solving practical management problems.

Key words: scientific activity of scientific research organizations, efficiency scientific activity indicator hierarchical system, the scientific activities effectiveness estimation.

Justification of measures for improvement of transport service of Armed forces of the Russian Federation on the basis of satellite monitoring of infrastructure of railway transport and a military transportations / D.D. Zikov, V.P. Mahon'ko, A.B. Spesivtcev, D.V. Shuvalov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 35–42.

The considerable volume of military transportations during direct threat of aggression and in a wartime will be carried out by railway. In these status the importance to gets use of modern technologies when monitoring a transport network, and also transportation processes in interests of ensuring expansion of groups of troops (forces). In this article was examined the improvement of transport service of Armed forces of the Russian Federation on the basis of satellite monitoring of infrastructure of railway transport and a military transportations.

Key words: transport service, satellite monitoring, railway transport, military transportations.

Methods for compensation of wave front distortions by optimizing the characteristics of the phased array radar systems. / A.P. Aleshkin, K.V. Bakurskiy, V.I. Nevzorov, P.V. Savochkin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 43–51.

Work is devoted the analysis of methods of adaptation of the external parameters and characteristics of the antenna of the radar station in the interest of compensating distortions of the wave front of the incident electromagnetic wave caused by the influence of the propagation environment.

Key words: phased array of radar systems, compensation of wave front distortions.

Blagodyrenko E.V., Nazarov A.V. The simulation modeling of hierarchical spacecraft's features recognition process based on multidimensional representation and recognition of spectrophotometric portrait // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 52–59.

Results of experimental studies of a combinatory-metric algorithm of multidimensional group point objects recognition in space of two-level signs of spacecraft's spectrophotometric portrait are presented in the paper. Priors uncertainty concerning a perspective of observation and coordinate noise of characteristics of group pointed representation of a train of curves cause existence of combinatory procedures (combinations and shifts) at quantitative assessment of a measure of proximity of the multidimensional group point objects representing subject to recognition in space of signs of photometric system ($U-B$), ($B-V$) and ($V-R$). On the example of templates of the states created according to the database of curves of gloss of the multichannel monitoring telescope estimates of indicators of reliability of recognition are received by the presented algorithm.

Key words: spacecraft, light curve, spectrophotometry, reliability of recognition.

Blagodyrenko E.V., Nazarov A.V. Combinatorial-metric algorithm for multidimensional group point objects recognition in the hierarchical space of photometric realization signs // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 60–68.

The combinatorial-metric algorithm for recognition objects with hierarchical spatially distributed organization of features proposed in the paper. A priori uncertainty regarding the view angle and the coordinate noise of the elements of the observation object determine the presence of combinatorial procedures (combinations and permutations) in quantifying the proximity measure of multidimensional group point objects representing the object of recognition in the anisotropic space of its features. To include in the search the results of recognition at lower levels of the hierarchy, characterized by lower a priori indicators of the reliability of recognition of primary features in order to increase the reliability of recognition proposed in the paper. Experimental curves of a priori and a posteriori indicators of recognition authenticity in the different object conditions and measurement terms given in the paper.

Key words: multi-level group point objects, image recognition, signs hierarchy, authenticity of recognition.

Burlakov S.O., Taranushchenko A.P., Shadrin A.G. Optimization of fair discipline of service of IP packets in the router // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 69–73.

The fair discipline of service of IP packets in the router is considered. In an assumption of a Poisson flow of their receipt the mathematical model of service is offered. Taking into account restriction for productivity of a communication channel the problem of search of an optimum proportion of the selected IP packets from priority queues is formalized. The example of a solution is given.

Key word: quality of telecommunication service, fair discipline of service, diverse traffic, priority queue, IP packet.

Vitenzon K.I., Vishinskiy A.P., Kolesnik A.V. The method of estimating the structural stability of the satellite communication system taking into account the importance of transmitted information // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 74–79.

The article proposes an original approach to the determination of the structural stability of a satellite communication system, taking into account the importance of the transmitted information between consumers. The applied tasks of calculating the performance of satellite communication systems are widely used both in the military-scientific substantiation of tactical and technical characteristics and in the choice of options for destabilizing effects on the control systems of the enemy's forces and weapons. The authors used a software-implemented recursive search-in-depth algorithm to analyze the trigger communication network, and also developed a methodological approach to ranking individual spacecraft, taking into account their contribution to the operation of the satellite communication system as a whole.

Key words: satellite communication system, spacecraft, structural stability, importance, recursive algorithm, ranking.

The direction of technology adoption modeling of space systems and complexes of means of automation of control centers of the armed forces of the Russian Federation / A.P. Vishinskiy, A.V. Kolesnik, E.M. Khalikov, A.V. Charushnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 80–86.

The article presents information on the results of the development of a software package for modeling the use of space systems and facilities. The technology of rapid formation of problem-oriented cross-platform applications is proposed. On the basis of the available experience of application and military-scientific support of automation tools, the proposals for the development of software-modeling base for research and implementation of modeling technologies in the practical activities of officials of the control centers of the Armed Forces of the Russian Federation are presented.

Key words: modeling, space systems and facilities, control centers, tools, software package, unification.

Method of calculation of reliability of reception of the message in a satellite radio channel of communication with small corners of vising at influence of not fading hindrance / V.V. Zvonarev, A.A. Kovalsky A.S. Popov, V.A. Pryakhin, A.V. Sherstyuk // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 87–94.

Satellite radio channels of communication with the small angles of vising at influence of not fading hindrance are considered. The offered calculation procedure allows to consider dynamics of a multiplicative hindrance in a satellite radio channel of communication and to determine his parameters in the presence of not fading additive hindrance when calculating reliability of reception of the message.

Key words: Reliability of reception, not fading noise, radio channel, channel model, probability of error, probability density.

Kovalenko A.Y., Kovalenko E.L., Tereshchenko S.V. Methodology of organizing information-navigation consumer support in the arctic zone of the russian federation // Proceedings of the

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 95–99.

The features of navigation support of various consumers in the Arctic are analyzed. Recommendations on the organization of information and navigation support using space navigation and communication systems are given.

Key words: Arctic, navigation, information transfer.

Kozinov I.A., Levoshko A.A. Adaptive selection of compression algorithms and formation of the signal and code constructions for operational transmission video data remote sensing of the earth according to radio channels limited capacity // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 100–109.

A method of adaptive selection of compression algorithms and the formation of signal-code constructions for the rapid transmission of video data from the Earth remote sensing spacecraft via radio channels with limited bandwidth is proposed. The method takes into account the peculiarities of the joint operation of compression algorithms and channel noise-resistant coding, and also allows to take into account the stability of compressed data to the occurring errors and failures during transmission over the radio channel. The influence of special compression algorithms used in the transmission channel of special information and the formation of signal-code constructions on the quality of video data recovery is considered. The results of simulation modeling of the compression and transmission of video data from the Earth remote sensing spacecraft are presented for various signal-to-radio channel ratios.

Key words: radio channel of video data transmission, signal code design, video data compression algorithm, Earth remote sensing.

Kuznetsov V.I. Full algorithm of solution the problem of the autonomous self-determination the motion of a space apparatus // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 110–121.

In the theory of autonomous navigation and orientation on the orbital motion around the Earth, the problem of self-determination of the spacecraft motion has not yet been fully considered. In this article, the definition of self-determination of motion, is the capacity of the spacecraft, to be autonomously, without communication and any other system or device, is determined, by the basis of on-board measurements and processing by the on-board computer: the orbit of the center of mass of the apparatus, the orientation of its body in three-dimensional space, the current time in the specified timeline.

Our model statistical estimates of the autonomous navigation and orientation method for virtual measurements of zenith distances of stars correspond to this range – which is the basis for certain optimism.

However, there are problems in the development of a general model for solving all the named problems and in the actual construction of a barycentric time scale from pulsar signals.

Key words: autonomous self-determination of spacecraft motion, navigation by pulsars, observability of the system, phase analysis, cross-correlation.

Likhachev V.M., Prodanetz V.A. Short-wave ray asymptotics in electromagnetic waves diffraction tasks in angular regions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 122–132.

Theoretical foundations of solution of electromagnetic scattering on impedance wedge-shaped structures in quasi-optical frequency range tasks are represented in the article. Special emphasis is placed on radiophysical regularities highlighting special characteristics of cylinder electromagnetic scattering in impedance angular regions. The fundamentals of the Sommerfeld-Malyuzhints method used for solving the indicated diffraction problems are described, mathematical algorithms are described that make it possible to take into account the influence of

the electromagnetic field incident on the radiophysical scattering characteristics of the considered wedge-shaped structures.

Key words: diffraction, cylindrical wave, impedance wedge, asymptotic solution, uninvasion zone, quasi-optical range, diffraction coefficient, phase term.

Stavtsev B.S. Verification of the method of reducing the level of the side lobes of the horn ultra-wideband antenna used in military radars // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 133–140.

The expediency of the developed method of reducing the level of the side lobes for the ultra-wideband V-shaped horn, the bending of the ends of the current-carrying tires of which corresponds to the elliptical shape, is verified. The results of electrodynamic modeling confirm the effectiveness of the proposed method.

Key words: horn ultra-wideband antenna, directivity coefficient, radiation pattern, side lobe level.

Yakimov V.L. Planning of spacecraft management information telemetric support operations with high autonomy level based on nonlinear models of parameter changes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 141–151.

A model approach to solving the problem of processing telemetry information and planning operations of information and telemetry support of spacecraft with high autonomy level, providing a given level of their operation reliability, is considered. The necessity of estimating the onboard autonomous spacecraft equipment state vector through the solution of nonlinear filtering problem in non-Gaussian noise and interference is shown. A logical scheme for choosing the intervals of spacecraft autonomous functioning with high autonomy level is proposed.

Key words: spacecraft, technical condition diagnostics, nonlinear dynamic system.

Method of the clustering of temporary parcels of the group signal in space of not power parameters on the basis of approximation of the basic trajectory at radio monitoring of CCC with MDVR / A.N. Abakumov, A.S. Bosyi, I.Y. Ereemeev, A.V. Peredry // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 152–160.

In article the method clustering time parcels in space of not power parameters on the basis of approximation of a basic trajectory for the purpose of decomposition of group signal MДБР is presented.

Unlike the known methods based on the analysis of an address part of passed messages, the described method carries out decomposition of a group signal on a basis clusterisation time parcels in space of not power parameters. Thus, by means of the given method hardware availability to signals of the user's terminals forming a group signal, in the conditions of aprioristic uncertainty concerning commutation-address parameters is provided.

Practical application of the developed method expediently for the counteraction organization to illegitimate use of a frequency resource of space devices-repeaters of satellite communication systems.

Key words: group signal decompression, earth station, repeater spacecraft, clustering.

Method of positioning of terrestrial stations on the relayed signals in the conditions of uncertainty of coordinates space device repeater with use of the unmanned aerial vehicle / A.S. Bosyi, I.U. Ereemeev, K.L. Ovcharenko, M.M. Tyustin, E.Y. Shilovskiy // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 161–169.

The article presents the test method identification of position modern earth stations with narrow beam using astronautic aeroballistic- retransmitter, disposed on geostationary earth orbit, and also retransmitter on unmanned aerial vehicle, patrol near radio monitoring.

As against known test method identification of position earth station, implement in terms of appraisement mutual delay repeater signal, in the quality parameter of location for method depart pseudorange, calculation of coordinates earth stations run in condition prior uncertainty about location astronautic aeroballistic-retransmitter.

Appraisement coordinate earth stations to be implemented maximum-likelihood method in the issue decision differential equation system. For develop method receive potential precision analytic form for calculation x-coordinate earth station in terms of bottom Rao-Cramer.

Execute calculation potential position accuracy earth station for district size on of 30 by 30 km. Testify that error of estimate resulting from statistical test, be in keeping with parameter error ellipsoid, receive using analytic form

Operationalization application of the developed method expedient to counteract illegitimate use of frequency resource of space vehicles-satellite repeaters communication system.

Key words: position location, earth station, repeater spacecraft, unmanned aerial vehicle, the mutual signal delay, pseudorange, the method of maximum likelihood. function.

Sazonov K.V., Tatarka M.V., Shuvaev F.L. The segmentation model event patterns in the sequences of the large size based on probabilistic suffix trees // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 170–175.

This article presents the segmentation model for categorical sequence analysis with probabilistic suffix trees (PSTs), i.e., structures that store variable-length Markov chains (VLMCs). VLMCs allow to model high-order dependencies in categorical sequences with parsimonious models based on simple estimation procedures. The model is specifically adapted to the field of computer sciences, as it allows for VLMC models to be learned from sets of individual sequences possibly containing missing values; in addition, the model is extended to account for case weights. This article describes how a VLMC model is learned from one or more categorical sequences and stored in a PST. The PST can then be used for sequence prediction, i.e., to assign a probability to whole observed or artificial sequences.

Key words: probabilistic suffix tree, Markov chain, conditional probability, segmentation, algorithm.

Chuvirov A.A. Approach contacting radiozonding of atmosphere in unlit meteorological areas // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 176–185.

Models and methods that will provide information on the actual spatial distribution of meteorological parameters in these areas are necessary for the organization of instrumental meteorological observations in areas that are not meteorologically illuminated, i.e. where it is not possible to make weather observations, such as mountain areas, Northern regions of Russia, as well as areas of emergency situations where search or rescue operations are required.

The article proposes a scientific and technical approach to solve the problem of rapid obtaining of actual meteorological data in unlit meteorological areas.

Key words: meteorological information, radiosonde, wind parameters

Analysis of threats of cognitive distortions of information and psychological object of control / K.O. Gnidko, A.O. Edinarhova, S.A. Makarov, A.S. Sergeev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 186–199.

An analysis of the threats of cognitive distortions of the information-psychological object of control is proposed. The article describes the cognitive distortions caused by the imperfection and incompleteness of knowledge, as well as the types of contamination of consciousness and how to prevent it.

Key words: cognitive distortions, consciousness contamination.

Danilov V.V., Yakunin V.I. Approximizing approach to detecting malware-infected hosts based on parametric analysis of DNS operations // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 200–212.

In this paper, we built a model for receiving DNS queries to a DNS server in order to develop an algorithm for estimating the values of the distribution parameters of the DNS query arrival time intervals, namely, their intensity. The obtained intensity values allow you to more fully describe the profiles of network objects using domain name services to determine the states of real objects. Using this option can enhance the capabilities of detection tools for specific malware.

Key words: DNS Server, DNS Query, domain, intake intensity, profiling network objects, hyper-exponential distribution, approximation, cache, caching records.

Zima V.M., Kryukov R.O. Method of forming protected virtual infrastructure in automated special purpose systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 213–223.

The paper presents an algorithm for the distribution of calibration equipment of metrological units of radio military units between military units in the conditions of implementation of measures of metrological support of troops (forces) in the fighting in order to improve the effectiveness of verification of measuring instruments for military purposes, taking into account the values of the load factors of calibration equipment.

Key words: metrological unit, the algorithm of decision-making, metrological support, electronic military unit.

The methods of communication spacecraft functioning radio monitoring means application scheduling / M.S. Brodsky, K.I. Vitenzon, P.A. Protsenko, S.V. Yanov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 224–234.

A mathematical approach to scheduling of application of means of radio monitoring of communication spacecraft functioning is proposed. The approach is based on either application of mathematical methods: the Hungarian algorithm or the method of finding the maximum weighted click. Comparative use of these methods to solve this problem allowed us to identify their dignities and shortcomings as well as to formulate recommendations for their use.

Key words: scheduling application, communication spacecraft, Hungarian algorithm, maximum weighted click

Vlasov S.A., Kubasov I.Y. Calculation the structure of orbit groups spacecraft global continuous survey surface Earth with use radio-locating // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 235–242.

Happen the algorithm and results of calculation structure of orbit groups spacecraft with radio-locating radar circular survey.

Key words: Spacecraft, orbit groups, structure of orbit groups, global continuous survey, momentary zone survey, corner half solution on boat apparatus.

Simulation of a spacecraft maneuvering for parrying dangerous approaches to space debris in geostationary orbit / A.O. Ivanov, E.V. Kotyashov, A.V. Charushnikov, V.A. Chernyavskiy //

Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 243–247.

The article notes that increasing the orbital constellation in geostationary orbit increases the risk of collision of existing spacecraft with space debris. Protective maneuvering considered as a way to counter possible threats. Different options of spacecraft's maneuvers were analyzed and it's mathematical modeling was conducted.

Key words: space debris, the geostationary orbit, geostationary spacecraft, transport operation, plan of transport operations.

Zikov D.D., Isupov A.A., Krupskiy K.A. Technique of justification of structure of means of trajectory measurements of a test range site under the scenario of carrying out a natural experiment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 248–253.

The technique of justification of structure of means of trajectory measurements on a test range complex in interests of estimation of its readiness for ensuring tests of military samples and special equipment taking into account requirements to the accuracy of estimation of parameters of their movement, and also formation of optimum plans of measurements on the basis of reasonable structure of means of trajectory measurements when ensuring tests of difficult military samples is developed.

Key words: object of tests, movement parameters, accuracy indicator, polygon measuring complex, means of trajectory measurements, experimental and test base.

Modeling of spacecraft moving parameters changing for collision between space debris and spacecraft in the space / A.M. Babin, P.S. Goncharov, M.V. Zhitnyy, L.P. Zozulya // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 254–258.

Mathematical model for calculation mass center and angle velocity spacecraft as the result high-velocity collision with space debris.

Key words: space debris, spacecraft, reactive impulse.

Burmistrov V.V., Zotkin M.Y., Richnjack A.M. Analysis of variants of design of superconducting magnetic executive bodies systems of orientation and stabilization small spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 259–266.

The article is devoted to the actual problems of development of superconducting magnetic Executive bodies for orientation and stabilization systems of small spacecraft. The proposed Executive bodies are based on new superconductors, the so-called high-temperature superconductors. Their main technical characteristics are obtained and a comparative analysis of one of the developed variants of the Executive body with magnetic Executive bodies of traditional design is carried out. Practical recommendations on the use of superconducting magnetic Executive body for orientation and stabilization systems of small spacecraft are given.

Key words: superconducting magnetic Executive body, high-temperature superconductor, superconducting short solenoid, superconducting key-jumper, cryogenic installation, car-Dan suspension.

Guryev I.S., Labetskiy P.V., Nemirov A.V. Application of magnetic field measuring instruments to search for objects in near-earth space // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 267–271.

The article deals with the search for objects in near-earth space by their own magnetic field. Provides an analysis of the main sources of the magnetic field of space objects.

An overview of modern magnetic field measuring instruments and approximate values of the detection range of objects.

Key words: space object, search by magnetic field, Earth's magnetic field, magnetometer, magnetic field measuring instruments.

Method of estimation degree of partial dimming of solar panels by structural elements of the earth remote sensing spacecraft / V.A. Vlasov, V.I. Gorbulin, D.L. Kargu, N.V. Radionov, D.A. Shubin // // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 272–278.

For calculation of the generated and consumed electric power by onboard systems of the spacecraft of remote sensing of the Earth it is necessary to make calculation of a number of parameters, including defining the area of shading of panels of the solar battery. When performing angular turns, due to the different geometric configuration of the spacecraft, the calculation of the shading area of solar panels is quite complicated. The article proposes a method of estimating partial dimming of solar panels, which is universal for spacecraft of any geometric configuration.

Key words: spacecraft, solar panel, shading of solar panels.

The concept of adaptive lifecycle management of objects of space rocket technology based on intelligent systems / Y.A. Gravchenko, B.K. Grankin, V.V. Kozlov, G.I. Kudriavcev, S.V. Chirva // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 279–289.

The article substantiates the relevance of the implementation of adaptive life cycle management of objects of rocket and space technology. It is proposed to solve the problems of adaptive control of the life cycle of objects of rocket and space technology with the use of automation of decision support in the sequential and phased implementation of artificial intelligence technologies.

The analysis of the system of interstate standards in the field of life cycle management of military products. For objects of rocket and space technology revealed a contradictory situation, expressed in the fact that on the one hand, there is an objective need for rapid decision-making to eliminate the failure of the object of rocket and space technology in abnormal conditions, on the other hand, the possibility of monitoring systems of the technical condition of these objects are limited, which generally requires improving the information capabilities of systems of operation of objects of rocket and space technology for the timely detection of abnormal conditions, forecasting their consequences and decision-making on management. It is proposed to assign these tasks to decision support systems.

The complex of models of subjects of operation is offered as a component of systems of support of decision-making. It is formed in the form of interrelated models of personnel of operating organizations, the structure of these organizations, algorithms for decision-making on the management of objects of rocket and space technology, algorithms for monitoring operational processes and personnel actions, security algorithms and algorithms for interaction with a single information environment.

Key words: life cycle, life cycle management, system concept, objects of rocket and space technology, emergency situation, unified information environment.

Demin A.P., Ershov D.S., Kul'kov A.V. The allocation algorithm for calibration of equipment Metrology departments of radio engineering regiments in the implementation of metrological support of troops in combat // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 290–296.

The paper presents an algorithm for the distribution of calibration equipment of metrological units of radio military units between military units in the conditions of implementation of measures of metrological support of troops (forces) in the fighting in order to improve the effectiveness of

verification of measuring instruments for military purposes, taking into account the values of the load factors of calibration equipment.

Key words: metrological unit, the algorithm of decision-making, metrological support, electronic military unit.

Dyakov A.N., Kokarev A.S., Trishunkin V.V. Technique of justification of the system of supply of spare parts of armament complex // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 297–308.

In modern economic conditions, the issue of increasing the effectiveness of weapons is of particular importance. Considering the operational and technical component, we can point out several of the most important areas for improving efficiency, on which the amount of budget financing that is required to maintain the required readiness indicators largely depends on the operational phase. One of these areas, namely the justification of the requirements for indicators of maintainability due to the planning of organizational and technical measures (excluding personnel qualifications), are considered in the presented article. The analysis of GOST 27.507 - 2015 [1], currently used for the formation of sets of spare parts of tools and accessories, is shown, the shortcomings of the use [1] are shown with respect to weapons models of the VKS. A technique is proposed to eliminate the identified shortcomings of scientific and methodological support, the application of the developed methodology allows one to substantiate the composition of a two-level spare parts kit (for each item), which ensures the maintenance of readiness at the required level with minimal costs.

Key words: justification of the spare parts kit, increase in maintainability, calculation of readiness index.

Kazancev D.I., Karytko A.A., Rodionov E.A. Method of calculating the performance of computing systems built on the basis of virtualization technologies // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 309–319.

The essence of the technique lies in the parallel asynchronous execution in the testing environment of a group of computational processes that implement the following data processing algorithms: direct and inverse fast Fourier transforms; red-black wood formations; solving a system of differential equations by the fourth-order Runge-Kutta method; LUP decomposition matrix. Computational experiments were performed in the environment of operating systems Debian 8, Elbrus-D. The paper presents the dependence of the execution time of these algorithms on the dimension of the original data in the native mode in computing systems based on x86-64, e2k processor architectures, as well as in various runtime environments deployed using virtualization technologies, for x86-64-kvm, lxc, for e2k-lxc, binary application level translator of executable program codes from x86-64 codes to Elbrus processor architecture codes - e2k. Based on the analysis of the resulting functional dependencies, a list of general recommendations for evaluating the performance of computing systems created on the basis of the virtualization technologies considered in the work has been compiled.

Key words: computation system, virtualization, power of computer, architecture of processor.

Kalmykov E.V. The approach to the development of the subsystem of maintenance of readiness of electro-mechanical equipment in the space force's objects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 320–326.

During the operation of electromechanical equipment, it becomes necessary to carry out measures to maintain the operability of this equipment and to adjust the maintenance and repair regimes taking into account their actual state. In this publication, the authors consider the task of

selecting the optimal maintenance and repair strategy for technical systems that include electromechanical equipment.

Key words: technical systems, electromechanical equipment, maintenance, repair, operability, resource, failure.

Method of structuring of the scorecard properties of rocket-space complex / V.V. Kozlov, I.O. Kukushkin, A.V. Lagun, V.L. Slatov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 327–336.

The main provisions of the method of structuring a system of indicators of the properties of a rocket-space complex, designed to identify the problematic aspects that accompany the life cycle of the complex, are presented. A system for assessing the quality of the complex functioning processes is proposed, based on the fractal hierarchical system of its particular indicators. The procedures for identifying the properties of the functioning of complexes, the formation of their indicators, as well as the aggregation of particular indicators into the final assessment of the quality of the functioning of the complex, are considered. The results of the application of the presented approach allow us to perform a comparison of the quality of the functioning processes of various complexes and outline ways to increase the level of such quality.

Key words: rocket-space complex, property, property indicator, fractal hierarchical estimation system, semantics, morphological analysis, dimension analysis, convolution of indicators.

Kryzhanvskiy V.I., Scherbakov V.I. A mathematical model of dual circuit tracking system for targeting of optoelectronic device. // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 337–345.

A dynamic mathematical model of dual circuit tracking system for the turn of swivel platform with optoelectronic device (OD) is developed. A steering of the OD optical axis to the target is performed by the simultaneous turn of the platform in azimuthal direction and the turn of the OD in height relatively to the platform. The influence of cross links between the circuits on the quality of the transition processes is investigated by means of numerical simulations.

Key words: mathematical model of movement, cross link, dual circuit tracking system, transition process, targeting.

Kalabin P.V., Kuzmichev Y.A., Shabalatov A.S. Method of changing dynamic specifications system type “gimbal actuator – engine chamber” // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 346–351.

The method of changing stabilization system specifications of carrier rockets in order to eliminate the resonance.

The article is exploring options of changing stabilization system specifications of carrier rockets for the purpose of eliminating the possibility of resonance occurrence in a system type “gimbal actuator – engine chamber».

There is a supporting rationale for changing vibration signals which are intended to be used for linearizing the dead-band of the gimbal actuator. Load dependencies of the elements of the engine chamber on the form of linearization signals are presented.

Key words: gimbal actuator, stabilization system, vibration signal, resonance, Fourier's series, the dead-band.

Maltsev G.N., Sklemin D.V. Determination of the time distribution law parameter of failure-free operation of the unified radio-electronic systems on the censored sample data failures // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 352–360.

The article presents the basic relations for estimating the failure rate of highly reliable unified radio-electronic systems from a censored selection of failure data of a group of radio-electronic systems by Kaplan-Meier method and for checking the compliance of the failure rate of the observed radio-electronic system with the average group failure rate. To obtain estimates of the parameters of the law of distribution of uptime statistics developments is presented in the form of a matrix of developments. The law of distribution of time between failures is assumed to be exponential, and the failure rate of a single radio-electronic system and the total failure rate of a group of radio-electronic systems are assumed to be Poisson. It is shown that due to the rare failures of highly reliable electronic systems, the time of statistical data accumulation is up to several years, and the use of censored sampling allows to reduce the required time of data accumulation in comparison with the use of standard methods of statistical analysis by about 2.5 times. With the service life of more than a decade this allows a significant part of the service life of electronic systems to be used in the planning of technical operation activities obtained and constantly updated estimates of the parameters of the laws of distribution of their uptime.

Key words: unified radio-electronic systems, reliability, failure rate, censored selection.

Zinoviev K.G., Sasunkevich A.A., Silant'ev S.B. Estimation of time spent spacecraft in the zone of radio visibility ground-based radiotechnical instrument // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 361–368.

The developed method of determining the boundaries of the radio visibility zone of the spacecraft by ground radio equipment is presented. An analytical expression for calculating the boundary of the radio visibility zone depending on the location of the RTS is obtained, the criterion for entering this zone is determined and the relations for calculating the parameters of the obtained expression are presented. An example of calculating the time spent by a spacecraft in the radio-visibility zone of a ground radio-technical means on the basis of the developed technique is given.

Key words: the zone of radio visibility, spacecraft, radiotechnical instrument.

Developed an algorithm for constructing the ampere characteristics of nonanar multi-fold solar batteries of the spacecraft for remote sensing of the Earth for partial shading of the valves: Scenarios approach / S.V. Aluev, D.L. Kargu, N.V. Radionov, G.B. Steganov, D.A. Shubin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 369–376.

The article has developed an algorithm for constructing the ampere characteristics of nonanar multi-fold solar batteries of the spacecraft for remote sensing of the Earth for partial shading of the valves. The problem is solved by summing the power of the set of structural units of solar cells, characterized by the total value of the voltage connected in parallel in the blocks of elementary generators. The value of these for the current total IVC connected with partial and full shading. Justified the choice of the type of model of photovoltaic analyzers of metric analysis in general and its structural units; a variant of building a power generation system with general and block-by-block extreme power regulation of solar batteries was considered power supply.

Justified the choice of type of model of photovoltaic cells. Taking into account the analysis of the geometry as a whole and its structural units, a variant of building a power generation system with general and block-by-block extreme power regulation of solar cells was considered.

Key words: volt-ampere characteristic, photoelectric converters, automation and stabilization complex, extreme power regulator, on-board power supply system.

Alexashov V.Y., Zavyalova G.M., Lebedev E.L. Determinants of the choice of innovative software systems for the development of electronic educational tools // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 377–385.

One of the main ways of transition to new educational concepts is automation of educational process on the basis of computer technology. The article summarizes the experience of applying computer-aided learning in the MSA named after A.F. Mozhaisky, the department "Production and repair of space vehicles" (now the department "Quality control and testing of weapons, military and special equipment") from the late 80-ies of the XX century. The analysis of software to automate training and testing of modern software Sunrav for creation of electronic manuals and electronic testing, in general, showed the effectiveness of their use.

Key words: automated training systems, electronic textbooks, e-book, e-textbook, Sunrav BookOffice, electronic testing, computer-aided learning.

Bagretsov S.A., Moldovanova C.M. The technique of determining the necessary number of kandidats in the system of training of scientific personnel (human resource qualification), according to the requirements of formed scientific directions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 386–392.

We consider the solution of the problem of forecasting the quantitative and qualitative composition of candidates at the entrance to the systems of training adjuncts and doctoral students at a higher educational institution, which at its output requires a number of scientific and higher qualification specialists required for the implementation of the tasks of this area of scientific and educational activities of a military university. The methodology takes into account the fuzziness of the initial data on the professional and personal characteristics of the contingent of candidates, reflecting their fuzzy belonging to different qualification groups, determining their capabilities (generally fuzzy) to successfully complete training in an adjunct or a doctoral program for a particular purpose of professional scientific or research and teaching activities in high school. The ratio of images of a contingent of candidates at the entrance to the training system and at its output is considered from the point of view of determining the image and the prototype of two sets when they are unclear, the Method takes into account the "sifting out" of candidates from the training system and the possibility of their many-valued participation in the formation of scientific specialists of various specializations.

Key words: system of training of scientific personnel and personnel of higher qualification; membership functions; fuzzy match; images and types of fuzzy sets.

Bagretsov S.A., Moldovanova C.M. Method of single-dimensional distribution of candidates by profession of specializations in scientific and educational units of higher education institutions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 393–399.

We consider the solution of the problem of rational distribution of candidates by specialization profiles for the case when one candidate is selected for several specialties (the problem of one-dimensional distribution of candidates). A blurry set apparatus is used to effectively combine a clear quantitative and qualitative analysis of the professional abilities of the candidates being distributed, as well as data on the conditions and requirements for professional activity arising from the goals of scientific and educational departments of the university, decision maker.

Key words: fuzzy sets, fuzzy preference relations, non-dominated alternatives, membership function, strict preference matrix.

Bagretsov S.A., Chernaya T.E. The method of determining the necessary conditions of training strategies changes (transformation points) in applying the principles of transformational theory of training // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 400–409.

The method is based on the model of studying the practical disciplines related to the processes of acquiring knowledge, skills and abilities of controlling the complex objects and processes that make

up the basis of future professional activity. The article considers the polystructural transformational training process in the form of a set of mutually dependent strategies. In the framework of this model the method of determining the statistical threshold conditions (transformation points) of transition from one strategy of training to another is described. The problem is solved on the basis of construction the nonlinear regression dependence of the difference between the achieved and the limit levels of training. On the basis of the estimates of standard errors of the regression parameters according to the Student's criteria the interval regression values are defined. The transformation point is determined on the basis of the optimal Wald's decision-making rules in the conditions of the independent statistical estimates of the significance of the difference between the reached and the limit levels of training concerning its threshold value.

Key words: training models, transformational training process, the point of transformation, nonlinear regression, standard errors of the regression parameters, Fisher's coefficient, Student's coefficient, the intervals of regression, the Wald's criterion.

Modeling for the formation of competencies among graduates of military schools / Y.M. Boguk, M.A. Golubev, D.V. Stavitski, A.V. Fetisov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 410–417.

The article presents the direction of development of a model for the formation of competencies among graduates of military schools, based on a complex set of sequential actions of teachers and cadets to achieve the required (necessary) level of formation of such competencies. This model can be used by officials of a military school who participate in the organization of educational activities for the implementation of basic professional educational programs.

Key words: military school, competence, method, modeling, module, educational activities.

Gytorovich O.V., Kovalev A.P., Latanov V.M. Formation and development of space units as part Of the armed Forces of the USSR and the Russian Federation (1981–1992) // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 418–425.

The article is devoted to the study of the historical experience of state-political leadership in the formation and development of space units as a new component of the Armed Forces of the country in the difficult conditions of the military-political situation in the world. The increased attention of the state-political leadership of the country to the problems of formation and development of space parts in the study period, according to the authors, was largely due not only to the desire of the United States to ensure dominance in space, but also to the action of a number of reasons that require special consideration. The article notes the increasing role of space units in strengthening the defense of the country, increasing the combat power of the Armed Forces, considers the tasks of space units, their inherent features, especially the deployment, combat and daily activities.

Key words: state and political leadership, the testing work (OIR), crew, duty, combat duty, the spacecraft (SC), the General Directorate of space means of defense of the USSR (GUKOS MO) office of the chief of space means of defense of the USSR (UNX MO), a research test site of the Soviet Defense Ministry (NIIP MO USSR), Chief research and test center, USSR Ministry of defense (GNIIT MO).

Selikhina N.V., Tereshchuk S.S. Legal responsibility of servicemen for failure to take measures to prevent and resolve conflicts of interest (problems and contradictions in law enforcement) // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 667. – P. 426–431.

The article provides a comprehensive analysis of norms regulating the application of penalties to servicemen for not taking measures to prevent and resolve conflicts of interest. The features of

penalties for corruption offenses are highlighted. Formulated proposals for changes in anti-corruption legislation.

Key words: military personnel, conflict of interests, responsibility, dismissal, in connection with loss of confidence improvement of anti-corruption legislation.

Абакумов Артём Николаевич, преподаватель 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57.

Авксентьев Александр Алексеевич, старший научный сотрудник 21-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: aaa1508@yandex.ru

Алексашов Валерий Юрьевич, преподаватель 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Алёшкин Андрей Петрович, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-31, e-mail: vka@mil.ru

Алуев Сергей Вадимович, старший преподаватель 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-22 e-mail: as1380@mail.ru

Бабин Александр Михайлович, старший научный сотрудник 123-й лаборатории (научно-исследовательской) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Багрецов Сергей Алексеевич, старший научный сотрудник 61-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 779-86-94, e-mail: sergeibagrecov@bk.ru

Бакурский Клим Валерьевич, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Благодыренко Евгений Васильевич, адъюнкт 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-33, e-mail: blagodyrenkoev@mail.ru

Богук Юрий Михайлович, профессор 71-й кафедры 7-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат военных наук; тел.: 8 (950) 016-07-01.

Босый Александр Сергеевич, адъюнкт 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

Бродский Максим Сергеевич, научный сотрудник 251-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 983-96-63, e-mail: brodik2577@mail.ru

Бурлаков Сергей Олегович, профессор 2-й кафедры Военной академии связи (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 907-79-34, e-mail: SOBurlakov@yandex.ru

Бурмистров Владимир Владимирович, преподаватель 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Витензон Кирилл Игоревич, адъюнкт 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 158-15-78, e-mail: witenzon_kirill@mail.ru

Власов Вячеслав Александрович, доцент 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-22, e-mail: vlasovsl@rambler.ru

Власов Сергей Александрович, доцент 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Вышинский Андрей Павлович, командующий 15-й армией Воздушно-космических сил (особого назначения) [143090, Россия, Московская обл., Краснознаменск].

Гнидко Константин Олегович, профессор 65-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (999) 532-71-82, e-mail: greeny598@gmail.com

Голубев Михаил Александрович, доцент 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (951) 167-81-81.

Гончаров Павел Сергеевич, начальник 12-го отдела (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Горбулин Владимир Иванович, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 347-95-22, e-mail: v_gorbulin@mail.ru

Гравченко Юрий Анатольевич, заместитель начальника 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 347-95-14, e-mail: juraGR2025@yandex.ru

Гранкин Борис Константинович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-14. e-mail: borisgrankin@yandex.ru

Гурьев Игорь Сергеевич, старший научный сотрудник 211-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского

го (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 238-21-01, e-mail: Guryev-is@mail.ru

Гуторович Ольга Викторовна, доцент 107-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, доцент; тел.: 8 (911) 841-69-19; e-mail: olwikgut@yandex.ru

Данилов Виталий Валерьевич, адъюнкт 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vitanator@yandex.ru

Демин Алексей Павлович, старший преподаватель 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347 96 61, e-mail: demyon@mail.ru

Джумков Валентин Валентинович, доцент 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 237-10-21.

Дьяков Алексей Николаевич, доцент 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: Dakoval@yandex.ru

Единархова Александра Олеговна, адъюнкт 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 395-79-19, e-mail: edinarchowi@mail.ru

Еремеев Игорь Юрьевич, профессор 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57.

Ершов Денис Сергеевич, старший инженер – инспектор отдела аккредитации, (г. Москва) федерального государственного бюджетного учреждения «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации (141006, Россия, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, 13); тел.: 8 (495) 583-99-33.

Житный Михаил Владимирович, старший научный сотрудник 123-й лаборатории (научно-исследовательской) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Завьялова Галина Михайловна, доцент 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Звонарев Виталий Валерьевич, начальник 233-й лаборатории – старший научный сотрудник 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 254-58-70.

Зима Владимир Михайлович, профессор 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 740-31-67, e-mail: vladimir_zima@mail.ru

Зиновьев Константин Геннадьевич, помощник начальника 1-го Государственного испытательного космодрома МО РФ по научно-исследовательской и испытательной работе; тел.: 8 (921) 483-39-68, e-mail: 13991_niir@mil.ru

Зозуля Людмила Петровна, старший научный сотрудник 122-й лаборатории (научно-исследовательской) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mail.ru

Зоткин Максим Юрьевич, преподаватель 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Зыков Дмитрий Дмитриевич, заместитель начальника Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (921) 949-29-40.

Иванов Алексей Олегович, начальник 43-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: iaomail@inbox.ru

Исупов Александр Анатольевич, старший научный сотрудник 243-й лаборатории (научно-исследовательской) Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (969) 722-81-07.

Исупов Никита Александрович, курсант 573-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21.

Казанцев Денис Иванович, начальник отдела информационных технологий Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 216-39-29, e-mail: zilan.ka@ya.ru

Калабин Павел Васильевич, адъюнкт 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Калмыков Евгений Витальевич, адъюнкт 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 263-95-36, e-mail: ek9112639536@yandex.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, начальник 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22 e-mail: dmitrii_kargu@mail.ru

Карытко Анатолий Александрович, преподаватель 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 841-34-95, e-mail: biintell@mail.ru

Ковалёв Александр Павлович, советник генерального директора АО «КБ «Арсенал» по стратегическому планированию; президент Санкт-Петербургского отделения Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3); академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 292-47-67, e-mail: kbarsenal@peterlink.ru

Коваленко Алексей Юрьевич, докторант 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Коваленко Елена Леонидовна, научный сотрудник 272-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16.

Ковальский Александр Александрович, начальник 231-й лаборатории – старший научный сотрудник 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 278-56-50, e-mail: sake636@mail.ru

Козинков Игорь Александрович, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 278-16-58, e-mail: garry-spb@yandex.ru

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

Кокарев Алексей Сергеевич, преподаватель 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: Askokarev@gmail.ru

Колесник Алексей Владимирович, докторант 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 940-65-57, e-mail: kolesnika@mail.ru

Котляшов Евгений Валериевич, докторант 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: kev246@mail.ru

Крупский Кирилл Анатольевич, начальник 211-й лаборатории – заместитель начальника отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (905) 707-43-43.

Крыжановский Владимир Иванович, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 310-66-37, e-mail: kvi02@mail.ru

Крюков Роман Олегович, адъюнкт 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 003-73-83, e-mail: roman682@yandex.ru

Кубасов Игорь Юрьевич, старший преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Кудрявцев Геннадий Иванович, генеральный директор АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг» (426000, Россия, Ижевск, ул. Максима Горького, 90); кандидат технических наук; тел.: 8 (3412) 78-30-74, e-mail: tynzinivan@rambler.ru

Кузнецов Владислав Иванович, старший научный сотрудник 22-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 209-83-98, e-mail: vladislav.kuzn@yandex.ru

Кузьмичев Юрий Алексеевич, доцент 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Кукушкин Игорь Олегович, начальник 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (981) 190-85-14, e-mail: Kio@mail.ru

Кульков Антон Викторович, старший эксперт Научно-технического комитета (Метрологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации) [119160, Россия, Москва, Большой Козловский пер., 6]; тел.: 8 (495) 693-31-31, e-mail: um@mil.ru

Лабецкий Павел Владимирович, преподаватель 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 837-69-89, e-mail: p.v.labetskiy@gmail.com

Лагун Андрей Валерьевич, доцент 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 89119370902, e-mail: Kio@mail.ru

Латанов Владимир Михайлович, профессор 107-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, председатель комитета Северо-западного союза «Ветераны космических войск» (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат исторических наук, доцент; тел.: 8 (921) 924-78-56; e-mail: Latanov52@mail.ru

Лебедев Евгений Леонидович, начальник 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Левашко Александр Александрович, адъюнкт 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 930-65-13, e-mail: levoshko.aleksan@bk.ru

Лихачев Владимир Михайлович, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: foldmar@yandex.ru

Макаров Михаил Михайлович, начальник 473-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Макаров Сергей Александрович, соискатель ученой степени 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 107 77 37, e-mail: makarovsergei112@rambler.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), доктор технических наук, профессор; 8 (812) 347-95-32, e-mail: georgy_maltsev@mail.ru

Махонько Виктор Петрович, заместитель начальника кафедры военных сообщений ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулёва (199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); доктор военных наук, доцент; тел.: 8 (911) 277-89-61.

Миронов Вячеслав Иванович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Молдованова Светлана Михайловна, младший научный сотрудник 61-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 908-00-76, e-mail: s.moldovanova@mail.ru

Назаров Андрей Вячеславович, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-33, e-mail: naz-av@mail.ru

Невзоров Валерий Иванович, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Немиров Алексей Владимирович, преподаватель 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 701-75-63, e-mail: nemirov-vka@yandex.com

Овчаренко Константин Леонидович, старший научный сотрудник – старший бортовой оператор 462-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-57, e-mail: kostao@ya.ru

Передрий Александр Васильевич, доцент 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57.

Петушков Александр Михайлович, старший научный сотрудник 27-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (812) 237-10-21.

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 231-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (961) 806-26-58.

Проданец Виктория Анатольевна, старший преподаватель 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: prodanets@mail.ru

Проценко Пётр Александрович, начальник 261-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 854-89-89, e-mail: prosvka@gmail.com

Пряхин Владимир Александрович, старший научный сотрудник 233-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 259-92-33.

Радионов Николай Васильевич, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор экономических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: radionov_nv@mail.ru

Ричняк Александр Михайлович, доцент 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Родионов Эдуард Александрович, курсант 955-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 765-50-13, e-mail: rodionovehdik@rambler.ru

Савочкин Павел Владимирович заместитель начальника 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mail.ru

Сазонов Константин Викторович, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: (812) 347-96-54.

Сасункевич Александр Анатольевич, преподаватель 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Селихина Наталия Викторовна, старший преподаватель 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 997-54-13, e-mail: zausehka@mail.ru

Сергеев Артём Сергеевич, соискатель ученой степени 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (960) 255-68-82, e-mail: artsergeev@yandex.ru

Силантьев Сергей Борисович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 951-16-32, e-mail: silantev2008@yandex.ru

Склемин Дмитрий Владимирович, начальник 532-й лаборатории – старший научный сотрудник 53-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: dv_sklemin@mail.ru

Слатов Валерий Леонидович, старший научный сотрудник 133-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 937-19-61, e-mail: Slatov65@mail.ru

Спесивцев Александр Борисович, младший научный сотрудник 243-й лаборатории (научно-исследовательской) Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 193-06-61.

Ставицкий Даниил Владимирович, заместитель начальника СПВИ войск национальной гвардии (Россия, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Пилютова, 1); тел.: 8 (931) 214-60-35.

Ставцев Борис Семёнович, старший научный сотрудник 423-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197082, Россия, Санкт-Петербург, ул. Генерала Хрулёва, 16); тел.: 8 (812) 393-95-72.

Стеганов Геннадий Борисович, доцент 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: sgb022.steganzov@yandex.ru

Таранущенко Александр Павлович, начальник узла связи Военной академии связи (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); тел.: 8 (921) 975-38-49.

Татарка Максим Васильевич, докторант 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Терещенко Сергей Валентинович, начальник 232-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского

(197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-96-21.

Терещук Сергей Сергеевич, военный прокурор отдела надзора Военной прокуратуры Центрального военного округа (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); капитан юстиции; тел.: 8 (961) 786-60-87, e-mail: sergey_1_9_9_1@mail.ru

Тришункин Владимир Викторович, начальник штаба материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации (119160, Россия, Москва, ул. Знаменка, 19); кандидат экономических наук; тел.: 8 (495) 696-97-00, e-mail: Dyakoval@yandex.ru

Тюстин Михаил Михайлович, старший научный сотрудник – старший бортовой оператор 452-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

Фетисов Александр Вадимович, профессор кафедры тактики СПВИ войск национальной гвардии (Россия, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Пилютова, 1); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (911) 251-79-27.

Халиков Эльдар Мавлютович, начальник 27-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-21.

Чарушников Александр Валерьевич, начальник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-21.

Черная Татьяна Эдуардовна, преподаватель 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 8 (911) 242-07-07.

Черный Сергей Эдуардович, заместитель начальника Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского по научной работе (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 237-10-21.

Чернявский Владимир Александрович, начальник 242-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: vladimirchernyavsky@yandex.ru

Чирва Сергей Витальевич, преподаватель 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-14. e-mail: chirva82@yandex.ru

Чувиров Алексей Андреевич, помощник начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-94-01.

Шабалатов Андрей Сергеевич, курсант 241-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Шадрин Александр Геннадьевич, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 901-33-72, e-mail: ag_shadrin@mail.ru

Шерстюк Андрей Витальевич, старший научный сотрудник 232-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 700-70-24.

Шиловский Евгений Юрьевич, адъюнкт 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

Шубин Денис Александрович, научный сотрудник 47-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: denshubin@bk.ru

Шуваев Фёдор Леонидович, адъюнкт 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 011-89-69, e-mail: cadetfed@mail.ru

Шувалов Денис Владимирович, докторант ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулёва (199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); кандидат технических наук; тел.: 8 (904) 632-95-20.

Щербаков Валерий Иванович, заведующий 114-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 707-16-75, e-mail: vka114@mail.ru

Якимов Виктор Леонидович, докторант 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: yakim78@yandex.ru

Якунин Владимир Иванович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: yavi1957@mail.ru

Янов Сергей Владимирович, начальник 272-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 263-54-53, e-mail: yanovsv@mail.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, начальник 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-12.

Абсалямов Дамир Расимович, профессор 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 244-33-13, e-mail: *damir73@yandex.ru*

Алексеев Тимофей Владимирович, профессор 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор исторических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-04.

Алёшкин Андрей Петрович, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-31.

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: *alexanderbas@mail.ru*

Голяков Алексей Дмитриевич, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 779-70-19.

Гончаренко Владимир Анатольевич, профессор 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-24.

Горбулин Владимир Иванович, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 299-27-76, e-mail: *v_gorbulin@mail.ru*

Гурьев Игорь Сергеевич, старший научный сотрудник 21-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 238-21-01.

Деев Владимир Викторович, старший преподаватель 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Добриков Владимир Анатольевич, доцент 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-33.

Каргу Дмитрий Леонидович, начальник 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 964-08-60, e-mail: *dmitrii_kargu@mail.ru*

Козырев Геннадий Иванович, профессор 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (904) 217-33-99, e-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

Кужекин Николай Сергеевич, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (911) 794-16-72.

Кульвиц Алексей Владимирович, заместитель начальника 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-16.

Кунтурова Надежда Борисовна, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: giz26@rambler.ru

Летучий Юрий Александрович, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 235-28-71, e-mail: vka.52@mail.ru

Лихачев Владимир Михайлович, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8(812) 347-95-07.

Лоскутов Андрей Иванович, начальник 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-70, e-mail: rk@viek.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: georgy_maltsev@mail.ru

Минаков Евгений Петрович, профессор 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8(911) 247-98-01, e-mail: ep.minakov12345@mail.ru

Миронов Александр Николаевич, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8(812) 347-96-13, e-mail: mironov-anik@yandex.ru

Москалев Виктор Михайлович, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(812) 347-95-31.

Мысливцев Тимофей Олегович, начальник 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Невзоров Валерий Иванович, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: *vka@mil.ru*

Новиков Евгений Александрович, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: *novikov.evg.alex@yandex.ru*

Павлов Александр Николаевич, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-62.

Паршуткин Андрей Викторович, профессор 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-35.

Пилькевич Сергей Владимирович, старший преподаватель 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 955-89-00.

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 23-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Поспишенко Василий Иванович, доцент 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 229-22-00.

Радионов Николай Васильевич, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор экономических наук, кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: *radionov_nv@mail.ru*

Репях Николай Андреевич, заведующий 109-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, доцент; тел.: 8 (911) 990-02-38, e-mail: *utkinodacha@yandex.ru*

Савочкин Павел Владимирович, заместитель начальника 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: *vka@mil.ru*

Сазонов Константин Викторович, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-54, e-mail: *sazonov-konstantin@yandex.ru*

Смагин Владимир Александрович, профессор 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Тарасов Анатолий Геннадьевич, заместитель начальника 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26.

Цветков Кирилл Юрьевич, начальник 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-97-25.

Чарушников Александр Валерьевич, начальник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-21.

Якунин Владимир Иванович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-87.