

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

Выпуск 664
2018 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 – заместитель начальника Военной академии воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова по учебной и научной работе *доктор воен. наук, проф.*;

М.А. Еремеев – начальник управления в/ч 74455 *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 – начальник лаборатории Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ*;

К.Г. Ставров – начальник научно-исследовательского океанографического центра

Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института *доктор техн. наук, проф.*;

С.В. Чварков – 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 **С.Г. Алёхин**, *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.Ю. Еремеев, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Замарин**, *доктор техн. наук, проф.*;

В.Н. Калинин, *доктор техн. 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.*;

А.Г. Ломако, *доктор техн. наук, проф.*; **Г.Н. Мальцев**, *доктор техн. наук, проф.*;

Ю.С. Мануйлов, *доктор техн. наук, проф.*; **Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук*;

А.В. Паршуткин, *доктор техн. наук, проф.*; **Н.А. Репях**, *кандидат филос. наук, доц.*;

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: *М.С. Панова*
Технический редактор
и компьютерная верстка: *Е.И. Леончук*

Техническая поддержка:
О.Е. Нестеренко

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

Подписано к печ. 17.12.2018.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 43,00. Уч.-изд. л. 21,25
Тираж 50 экз. Заказ 3675/114.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Алейник В.В., Гончаревский В.С.</i> История факультета автоматизированных систем управления войсками	5
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ	
<i>Бахмут А.Д., Крылов А.В., Охтилев П.А.</i> Полимодельное описание интеллектуальной системы мониторинга технического состояния ракеты-носителя «Союз-2»	10
<i>Бугайченко П.Ю., Данилов А.И., Зубачёв А.М.</i> Динамическая модель оценивания качества подготовки и применения сложной технической системы ...	20
<i>Гончаревский В.С.</i> Особенности и способы управления взаимным маневром космических аппаратов при осуществлении стыковки с орбитальными станциями.....	27
<i>Легков К.Е., Оркин В.В.</i> К вопросу моделирования функционирования информационной подсистемы автоматизированной системы управления	34
СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ	
<i>Мосин Д.А., Садыков Д.В., Скрипников А.Н.</i> Методика баллистического обоснования структуры орбитальной группировки космических аппаратов непрерывного обслуживания Арктического региона	43
ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
<i>Григорьев А.Н., Дмитриков Г.Г., Попович Т.В., Пятицкий А.А., Смирнова О.В.</i> Принципы и примеры использования технологии дистанционного зондирования в информационном обеспечении инфраструктур пространственных данных	51
РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ	
<i>Антошина В.М., Казанцев А.М., Линкевичиус А.П.</i> Агрегирование статических и динамических моделей для оценки надежности радиолокационной станции дальнего обнаружения крупноблочной структуры.....	60
<i>Бурлаков А.А., Дорошенко Г.П., Левко И.В., Легков К.Е.</i> Методика организации системы снабжения войск комплектами военно-технического имущества связи и автоматизированных систем управления.....	69

<i>Горбулин В.И., Ходор М.А.</i> Математическое обоснование автоматического распределения областей ответственности элементов оптико-электронного сегмента системы наблюдения.....	77
<i>Колесников К.Г., Масалкин А.А., Москвин Б.В., Шульгин А.Е.</i> Координационное планирование целевого применения кластера малых космических аппаратов в задачах мониторинга земной поверхности.....	86
<i>Коченов Н.В., Лебякин И.А., Негодин Д.В., Нестеренко О.Е.</i> Модель перспективного вычислительного комплекса, имеющего многовариантные возможности по организации обмена данными между его компонентами	95
<i>Кравцов А.Н., Новиков А.Н., Ширямов О.А.</i> Математическая модель прогнозирования изменения критической составляющей погрешности рабочего эталона единицы величины с учетом априорной информации.....	102
<i>Самойлов Е.Б., Шмелёв В.В.</i> Метод синтеза функционально-логических программ потоковых вычислений при мониторинге состояния технических систем	110

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Деев В.В., Копкин Е.В., Ткаченко В.В.</i> Анализ возможностей технологии LTE в системах передачи и обработки телеметрической информации	121
<i>Лепешкин С.А., Мишуков О.А.</i> Особенности совместной обработки разномасштабных изображений в автоматизированных системах дистанционного зондирования распределенных объектов.....	131

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

<i>Гончаров А.М., Шульгин А.А.</i> Математическая модель уровня сформированности профессиональных компетенций в адаптивной системе обучения специалистов	141
<i>Лепешкин С.А., Логовский А.С., Пророк В.Я., Харебин Д.А.</i> Построение автоматизированной информационно-образовательной среды подготовки военных специалистов на базе учебно-тренировочных средств радиоэлектронных станций дальнего обнаружения.....	151
Рефераты статей	161
Сведения об авторах	167
Сведения о рецензентах.....	171

В.В. Алейник,

кандидат военных наук, доцент;

В.С. Гончаревский,

заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор техн. наук, профессор

ИСТОРИЯ ФАКУЛЬТЕТА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЙСКАМИ

Факультету «Автоматизированные системы управления войсками» 16 декабря 2017 года исполнилось 50 лет. В настоящее время он является одним из основных структурных подразделений Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Факультет осуществляет подготовку специалистов и ведение научной деятельности в области построения, применения и эксплуатации комплексов средств автоматизации управления войсками Воздушно-космических сил. Он готовит военных специалистов по пяти образовательным программам высшего образования и по двум программам среднего профессионального образования. Все специальности, по которым готовятся выпускники факультета, являются уникальными, а военные специалисты всегда востребованы в войсках Министерства обороны и ведомствах силовых структур Российской Федерации.

В статье рассматриваются причины и истоки образования факультета автоматизированных систем управления в академии имени А.Ф. Можайского. Характеризуются особенности подготовки на факультете специалистов по автоматизации управления. Излагаются основные направления исследований кафедральных научных школ.

Ключевые слова: факультет; кафедра; автоматизированная система управления; научная школа; научные исследования.

Факультет «Автоматизированные системы управления (АСУ) войсками и связи» был основан в академии имени А.Ф. Можайского в декабре 1967 года [1].

Появление факультета было вызвано быстрым развитием в конце 50-х и в начале 60-х годов автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими комплексами и технологическими процессами их подготовки к целевому применению, широким внедрением в войсках элементов электронно-вычислительной техники и средств управления ракетами и космическими аппаратами. Для организации эффективного процесса эксплуатации новых образцов ракетно-космической техники и вооружения, оснащенных сложными системами управления, требовались высококвалифицированные военно-инженерные кадры. Эту важнейшую задачу и должен был решать факультет «АСУ войсками и связи». Он был создан на базе ряда кафедр радиотехнического факультета, которые уже до этого занимались в академии вопросами автоматизации и управления и накопили определенный научный и учебный потенциал в данных областях науки и техники. Начальником факультета был назначен профессор Н.И. Буренин – видный ученый в области АСУ и связи. Он возглавлял факультет в годы становления и укрепления Ракетных войск стратегического назначения (РВСН).

Следует отметить, что к моменту образования факультета еще не была в достаточной степени развита общая теория АСУ, проблематичными были основные принципы их построения, не было еще установившейся терминологии и достаточного арсенала основных понятий теории сложных систем. В связи с этим работа факультета и кафедр по становлению учебного процесса и организации научных исследований была исключительно сложной. Тем не менее комплекс теоретических и практических проблем был успешно решен под руководством Н.И. Буренина в самые сжатые сроки. Была осуществлена коренная переработка учебного материала. Были переработаны учебные планы и программы, сформированы научные основы, методика преподавания курсов, введены новые дисциплины, учебные лаборатории были оснащены современной аппаратурой и приборами.

В годы создания и развития частей космического назначения и Военно-космических сил (ВКС) факультет продолжал успешно решать задачи по подготовке высококвалифицированных военных специалистов в области АСУ и связи сначала под руководством талантливого

ученого профессора В.Н. Калинина, благодаря усилиям которого была внедрена системно-кибернетическая концепция развития факультета, а затем факультет возглавил профессор В.С. Гончаревский, который продолжил дело своих предшественников. Далее В.А. Пряхин, обладавший богатым опытом эксплуатации ракетного вооружения, средств боевого управления и связи, приложил немало усилий для того, чтобы приблизить учебно-воспитательный процесс к потребностям войск. После В.А. Пряхина на должность начальника факультета был назначен доцент С.Е. Близнюк – компетентный специалист в учебной и научной областях.

В годы создания, становления и развития Космических войск (КВ) факультетом руководил опытный педагог и воспитатель профессор В.В. Богорев. В 2011 году после ряда структурно-штатных преобразований факультет получил название «Факультет автоматизированных систем управления войсками» и его возглавил доцент В.В. Алейник.

В настоящее время факультет «Автоматизированные системы управления войсками» является одним из основных структурных подразделений Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Он осуществляет подготовку специалистов и ведение научной деятельности в области построения, применения и эксплуатации комплексов средств автоматизации управления войсками Воздушно-космических сил. Факультет готовит военных специалистов по шести образовательным программам высшего образования. Ими являются:

1. Математическое обеспечение АСУ космических аппаратов.
2. Применение и эксплуатация вычислительных комплексов ракетно-космической обороны (РКО).
3. Автоматизированная обработка и анализ информации космических средств.
4. Техническое обеспечение АСУ космическими аппаратами.
5. Программно-алгоритмическое обеспечение АСУ РКО.
6. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники.

Также ведется подготовка по двум программам среднего профессионального образования, к которым относятся:

1. Эксплуатация вычислительных машин, комплексов, систем и сетей.
2. Эксплуатация и ремонт измерительной техники.

Все специальности, по которым готовятся выпускники факультета, являются уникальными, а военные специалисты постоянно востребованы в войсках Министерства обороны и ведомствах силовых структур Российской Федерации.

Подготовка ведется ведущими специалистами в области автоматизации управления, обработки и анализа информации, а также в области метрологии. Участвующий в этой работе профессорско-преподавательский и инженерно-технический состав факультета вырос в недрах кафедральных научных школ. Сегодня эти школы включают в себя 10 докторов и 58 кандидатов наук. Шесть ученых факультета имеют ученое звание «профессор», двум из них присвоено почетное звание «заслуженный деятель науки РФ», 24 – ученое звание «доцент», пятерым из них присвоены почетные звания Министерства образования и науки РФ.

Факультет выполняет требования аккредитационных показателей по проценту профессорско-преподавательского состава (ППС), работающего на штатной основе, количеству ППС с учеными степенями и званиями, количеству ППС высшей квалификации (докторов наук и профессоров), проценту адъюнктов, защитившихся в течение года после завершения подготовки. Общая укомплектованность должностей ППС факультета лицами, имеющими ученую степень, – 92%.

На факультете ведется активная научно-исследовательская, изобретательская и военно-научная работа по фундаментальным и прикладным проблемам автоматизации управления войсками и техническими средствами, стоящими на их вооружении. Необходимо подчеркнуть, что факультет за время своего существования внес и продолжает вносить существенный вклад в укрепление научного потенциала академии [2, 3]. Профессорами и преподавателями факультета был основан ряд научных школ по различным аспектам теории

и практики автоматизации управления, получивших признание широкой научной общественности. Среди них хотелось бы отметить такие школы, как школа автоматизации организационного управления (создатель школы – профессор Н.И. Буренин), школа системного анализа и космической кибернетики (создатели – профессора Ф.М. Килин и В.Н. Калинин), школа проблем автоматизации обработки и анализа измерительной информации космических средств (создатель – профессор А.К. Дмитриев) и школа проблем эксплуатации, надежности средств АСУ и метрологического обеспечения вооружения (создатели – профессора Н.М. Седякин и А.Я. Маслов). Одна из этих школ, а именно школа системного анализа и космической кибернетики, внесена в реестр ведущих военно-научных школ (ВНШ) Министерства обороны Российской Федерации и в реестр ведущих научных и научно-педагогических школ (НПШ) Санкт-Петербурга. Научные исследования школ осуществлялись и осуществляются сейчас в сотрудничестве с ведущими организациями ракетно-космической отрасли и войсковыми частями. В рамках данных школ подготовлено более 30 докторов и около 300 кандидатов наук. Ими выполнено свыше 400 научно-исследовательских работ (НИР) в интересах заказчиков ракетно-космической техники и ее изготовителей, получено около 600 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Основными направлениями исследований научных школ факультета являются:

- теоретические основы космической кибернетики, теория космического планирования и управления орбитальными и наземными космическими средствами, принятие решений при автоматизированном управлении космическими средствами;

- методологические основы теории многоструктурного анализа и синтеза многоконтурных систем управления военно-техническими комплексами на различных этапах их жизненного цикла;

- теоретические основы диагностирования объектов ракетно-космической техники как во время их испытаний, так и при штатной эксплуатации по результатам телеизмерений, создание систем информационного обеспечения анализа летно-технических характеристик (ЛТХ) этих объектов;

- разработка программных средств обучения боевых расчетов анализа ЛТХ и боевых расчетов обработки телеметрической информации, создание автоматизированных обучающих систем подготовки и переподготовки персонала;

- анализ и моделирование процессов функционирования сложных военно-технических систем;

- разработка автоматизированных рабочих мест должностных лиц органов управления, а также информационных систем органов и пунктов управления на основе использования современных и перспективных информационных технологий.

На основе работ в перечисленных направлениях удалось создать уникальный тренажерный комплекс управления КА – «Учебный центр управления полетами КА», позволяющий имитировать процесс принятия решений по планированию и оперативному управлению малыми КА серии «Можжец», КА других орбитальных группировок и наземными средствами для различных звеньев управления в условиях обстановки, близкой к реальной. Комплекс используется для проведения тактико-специальных и командно-штабных учений и игр с различными категориями обучающихся (от курсантов до старшего и высшего руководящего состава войск). Разработан и испытан унифицированный программный комплекс, характеризующийся высокой помехозащищенностью, достоверностью, метрологической надежностью и экономической эффективностью. Для повышения качества эксплуатационной подготовки выпускников, проведения всех видов занятий, а также исследований и испытаний новых видов специального программного обеспечения обработки и анализа телеметрической информации в составе учебного наземного комплекса управления КА создан учебный телеметрический центр.

Факультет, его научные школы и воспитанники активно участвуют в разработке, создании и эксплуатации целого ряда конкретных АСУ войсками и техническими средствами, которые

стояли и сейчас стоят на вооружении армии РФ. Необходимо отметить и подчеркнуть одну особенность этих работ. В них постоянно принимали и сейчас принимают самое активное участие наши обучающиеся. На факультете работает военно-научное общество (ВНО) слушателей и курсантов. В кафедральных секциях ВНО под руководством опытных преподавателей обучающиеся ведут исследования по тем или иным частным вопросам факультетских и академических НИР. Результаты этих исследований используются в курсовых и дипломных проектах, они докладываются на научно-технических семинарах и на ежегодных военно-научных конференциях ВНО. Наиболее интересные и ценные результаты публикуются в печати, а также включаются в отчеты по НИР, выполняемым факультетом и академией. Курсанты, работающие в ВНО, участвуют в проводимых регулярно академических и межвузовских конкурсах студенческих научных работ. Многие из них становятся лауреатами этих конкурсов. Так, за последние три года призерами таких конкурсов стали 11 курсантов факультета. По количеству и качеству курсантских конкурсных научно-технических разработок наш факультет занимает в последние годы передовые позиции в академии.

За годы существования факультета его профессорско-преподавательским и инженерно-техническим составом был выполнен огромный объем работы по повышению качества подготовки специалистов в области автоматизации управления. Это касается и совершенствования учебно-воспитательного процесса, и обновления учебно-материальной базы, работы по обеспечению учебных дисциплин необходимой учебной литературой. Так, преподавателями факультета были подготовлены и опубликованы в различных издательствах страны более 100 учебников.

В 2012 году учебник «Управление космическими аппаратами и средствами НКУ» (авторский коллектив – Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский, И.И. Делий, Е.А. Новиков) в конкурсе Министерства обороны Российской Федерации на лучшие научные работы был удостоен первой премии, в 2014 году учебник «Военная си-стемотехника и системный анализ» (авторский коллектив – А.Н. Павлов, Б.В. Соколов, Б.В. Москвин, Д.Н. Верзилин) завоевал вторую премию Министра обороны РФ, в 2015 году учебник «Автоматизированная обработка телеметрической информации» (авторский коллетив – В.А. Чикуров, В.В. Шмелев, В.Г. Зиновьев, В.В. Казаков, В.А. Каргин, А.Н. Кравцов, Ю.С. Мануйлов, В.В. Мышко, Е.Б. Самойлов, В.И. Сучков, В.В. Деев, О.Г. Лазутин, Д.Н. Бородько) – первую премию Министра обороны, в 2016 году учебник «Теория принятия решений» (автор – Б.В. Москвин) опять завоевал первую премию, а в 2018 году учебник «Основы теории систем и управления» (авторский коллектив – В.Н. Калинин, К.Г. Колесников, Б.В. Москвин, А.Н. Павлов) удостоен второй премии. Таким образом, уже в течение ряда лет учебники факультета являются лауреатами этой премии. По качеству подготовки специалистов факультет занимает одно из ведущих мест в академии. Более 100 выпускников факультета закончили обучение с золотой медалью. На факультете имеется доска почета, куда заносятся имена золотых медалистов, которые являются его гордостью. На своих выпускников факультет получает, как правило, только отличные отзывы из войсковых частей и других организаций, где они проходят службу.

Факультет «Автоматизированные системы управления войсками» Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского имеет большую и славную историю. Выпускники факультета и воспитанники его научных школ успешно служат в войсках и активно участвуют в создании, испытаниях и эксплуатации военной и космической техники.

Список используемых источников

1. ВИКИ имени А.Ф. Можайского: очерк истории 1941–1991 гг. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1990. – 394 с.

2. *Гончаревский В.С.* Факультет автоматизированных систем управления и связи и его научные школы // Военно-космическая деятельность России – истоки, состояние, перспективы: тр. научно-практ. конф. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – С.94–96.

3. История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде). – СПб.: Наука, 2008. – Вып. 1: Яркие фрагменты истории. – 356 с.

А.Д. Бахмут,
АО «НИО ЦИТ “Петрокомета”», г. Санкт-Петербург;
А.В. Крылов,
АО «НИО ЦИТ “Петрокомета”», г. Санкт-Петербург;
П.А. Охтилев,
АО «НИО ЦИТ “Петрокомета”», г. Санкт-Петербург

ПОЛИМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «СОЮЗ-2»

В статье предложен способ решения задачи проектирования систем оценивания и анализа технического состояния (ТС) ракеты-носителя (РН) «Союз-2», предназначенных для информационной поддержки лиц, принимающих решения (ЛПР), на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) РН. Рассмотрены современные проблемы и предъявляемые требования к оперативности и качеству оценивания и анализа ТС космических средств на всех этапах их ЖЦ. Анализ предметной области (ПрО) показал необходимость применения новой интеллектуальной информационной технологии (ИИТ), представленной в статье, при проектировании систем мониторинга состояния, используемых ЛПР при управлении ЖЦ РН «Союз-2». При этом в качестве теоретической основы такой технологии рассмотрена модификация обобщенной вычислительной модели (ОВМ) как модели представления знаний, позволяющей по спроектированным специалистом ПрО согласованным имитационно-аналитическим моделям в автоматическом режиме синтезировать схемы программ прикладного программного обеспечения (ПО) системы мониторинга ТС РН «Союз-2». В статье представлены необходимые для решения поставленной задачи модели, и показано, что применение новой ИИТ позволяет спроектировать систему мониторинга ТС РН «Союз-2» на всех этапах ее ЖЦ.

Ключевые слова: мониторинг состояния; система искусственного интеллекта; информационная поддержка жизненного цикла; сложный организационно-технический объект.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития ракетно-космической отрасли характеризуется возрастанием сложности космических комплексов (КК) и процессов управления ими. Так, например, ЛПР сталкиваются со сложностями, связанными с низкой оперативностью, качеством оценивания и достоверностью результатов оценивания ТС РН при управлении ее ЖЦ. В этих условиях появляется актуальная задача создания так называемого единого виртуального электронного паспорта РН «Союз-2» [2, 3]. Эта задача, в частности, предполагает необходимость интеграции данных о состоянии РН на всех этапах ее ЖЦ, начиная от проектирования и вплоть до утилизации, в единую информационную систему. При этом возникает необходимость ведения аналитической деятельности по оцениванию ТС изделия, которая по сей день осуществляется практически вручную [1–5]. Результативность такой деятельности во многом зависит от экспертов ПрО, чьи знания и осведомленность становятся определяющими для успешного решения задачи.

В рассматриваемой ПрО РН и организации, связанные с ней, относятся к классу сложных организационно-технических объектов (СОТО) [6]. Функционирование СОТО характеризуется множеством потоков сверхбольших объемов данных и информации различной природы, неполнотой и недоопределенностью информации о состоянии РН, высокой стоимостью ошибок, наличием директивного времени на принятие решения при управлении СОТО, наличием различного рода структур, изменяющихся во времени (структурная динамика): организационных структур предприятий, структур изделий, функциональных структур. [4, 6].

В современных условиях решение указанных задач невозможно без наличия эффективных инструментальных средств автоматизации и интеллектуализации процессов мониторинга состояния при управлении ЖЦ СОТО.

СИСТЕМА ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ И НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ВХОДЯЩИХ В ИХ СОСТАВ ИЗДЕЛИЙ

В случае, когда речь идет о КК, автоматизированные комплексы мониторинга состояний при управлении ЖЦ СОТО, в соответствии с ГОСТ РО 1410-002–2010, должны функционировать в рамках «Системы информации о ТС и надежности КК и входящих в их состав изделий». Создание системы информации продиктовано необходимостью своевременного обеспечения соответствующих лиц и организаций, участвующих в создании, производстве и эксплуатации КК, достоверными сведениями, необходимыми для выполнения работ по повышению уровня качества оценивания ТС КК и входящих в их состав изделий. При этом система информации должна быть единой для всех предприятий и организаций, участвующих в решении задач, связанных со всеми этапами ЖЦ СОТО.

Существующая система информации о ТС и надежности КК обладает рядом недостатков:

- отсутствием автоматизированных систем обработки и анализа больших объемов разнородной, зачастую неполной и недоопределенной информации о ТС КК;
- наличием многочисленных, несовместимых между собой, выполненных по различным технологиям информационных систем, т. е. не сформировано единое информационное пространство КК;
- слабым уровнем автоматизации и интеллектуализации процессов обработки информации о ТС КК;
- отсутствием многофункциональных и унифицированных методов сбора, обработки и анализа информации о ТС КК в режиме реального времени;
- ограничениями, связанными с возможностью оперативного доступа к информации о ТС КК;
- отсутствием автоматизированного информационного сопровождения ЛПР.

В результате для лиц, осуществляющих эксплуатацию КК и входящих в них изделий, нет возможности проведения комплексного оценивания ТС КК. В качестве отечественного решения информационной поддержки ЖЦ изделий в настоящее время предлагается новая технология построения системы информации о ТС СОТО на основе единых баз данных и знаний (БД, БЗ). В ее состав входят распределенная вычислительная сеть предприятий и организаций, участвующих в системе информации о ТС СОТО, а также соответствующие аппаратно-программные комплексы мониторинга ТС подсистем и элементов РН в реальном масштабе времени.

ПРОБЛЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В рамках решения поставленной задачи для описания процессов в СОТО был использован модельно-ориентированный подход к формализации знаний экспертов ПрО, основанный на концепции А.С. Нариньяни [11]. Такой подход в отличие от процедурального алгоритмического описания обладает рядом преимуществ для решения рассматриваемой задачи. Модели позволяют не просто определять порядок преобразования входных данных в выходные, как это происходит в алгоритме, но оперировать абстрактными сущностями и отношениями между ними, что позволяет формализовать комплексное и многоаспектное описание ПрО. Сравнивая известные свойства моделей и алгоритмов, можно отметить следующие преимущества моделей: они могут быть недоопределенными, в неявной форме определять все знания, связанные с объектом модели, в общем случае определять все пространство решений. При этом стоит отметить, что модель принципиально декларативна и задает лишь описание ПрО, но не задает вычислительный процесс. В современной литературе можно выделить ряд научно обоснованных методологий, предполагающих синтез прикладного ПО по модельному описанию ПрО [7–12]. В таком случае образуется следующий порядок моделирования

в терминах А.С. Нариньяни: «объект → модель → задача → функция → алгоритм → вычисление», где модель (множество параметров и операторов) и задача являются вычислительными. Для алгоритма остается лишь вычислительная роль в составе модели.

В рамках теории автоматизированного мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных объектов развивается идея о том, что сложный объект можно представить набором семантически связанных структур [4]. В рассматриваемой задаче к таким структурам относятся, например, электронная структура изделия, электронная организационно-штатная структура организаций, структурно-функциональные модели процессов в СОТО. При этом в течение ЖЦ СОТО изменение в одной структуре влечет за собой изменения в других. Учет их взаимного влияния – это комплексный подход к описанию рассматриваемой системы, который возможен только при применении системного моделирования и формирования взаимосвязанного полимодельного описания ПрО, где каждая структура представлена своей моделью [4].

С позиции теории искусственного интеллекта (ИИ) одним из способов построения информационной модели ПрО является формирование концептуального полимодельного описания ПрО на основе фактов, правил, а также состава и структуры данных этой ПрО, задаваемых специалистом ПрО непрограммистом. При этом такое концептуальное описание за счет использования некоторых моделей представления данных (МПД) и МПЗ, позволяющих сформировать соответствующие БД и БЗ, может быть в автоматическом режиме конструктивно представлено как конечный набор параметров и вычисляющих их значения алгоритмов в схемах программ. В итоге конечный пользователь получает прикладное ПО, сформированное экспертом в автоматическом режиме по полимодельному описанию ПрО [13, 14].

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Одним из средств концептуального моделирования и программирования ПрО является ОВМ [12]. К классу ОВМ, в частности, относится МПЗ, называемая G-моделью [7]. G-модель является основой для создания имитационно-аналитического полимодельного описания и возникла как результат обобщения таких существующих подходов в рамках систем ИИ, как концептуальное программирование, программирование в ограничениях, мультиагентное моделирование и др. Программный комплекс (ПК) системы мониторинга состояния ТС СОТО может быть синтезирован посредством формального вывода схем программ вычислений в виде G-сетей по G-моделям. При этом такой ПК позволяет осуществлять оценивание состояния СОТО с применением методов теории распознавания образов. Целью функционирования ПК является получение обобщенных оценок совокупности параметров состояния системы, значения которых в явном виде указывают на степень работоспособности подсистем и элементов СОТО, определение вида и места возникшей неисправности, прогнозирование процессов и явлений с заданной точностью и интервалом прогноза и пр.

G-модель описывается следующим кортежем [7]:

$$M_G = \langle X_M, R_M, P_M, \Delta_M \rangle, \quad (1)$$

где X_M – параметры объекта анализа;

R_M – множество отношений между параметрами;

P_M – множество предикатов, предметными переменными в которых являются элементы X_M ;

Δ_M – отображение из R_M в P_M .

G-модель графически представляется двудольным ориентированным мультиграфом, состоящим из вершин-параметров и вершин-операторов (рис. 1). Стоит отметить, что операторы ограничены набором вычислимых функций и реализуются с использованием некоторых алгоритмов. Также заданы узлы-предикаты, интерпретируемые как условия применимости того или иного оператора.

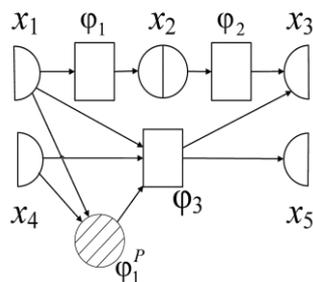


Рис. 1. Пример операторной схемы G-модели

Использование G-модели связано с формированием продукционной БЗ, наполняемой специалистом ПрО. Полная и детальная формализация заданной ПрО с помощью концептуальной схемы БЗ, иерархический способ представления знаний, набора объектов, понятий и их отношений обеспечивают формирование онтологии – точной спецификации заданной ПрО. С ее помощью также создается словарь для представления и обмена знаниями об этой ПрО и множество связей, установленных между терминами в этом словаре.

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

МПД является концептуальной семантической моделью, которая обеспечивает внутреннюю интерпретируемость и структурированность информации о ТС СОТО, при этом разделяя потоки информации по элементам структур СОТО. МПД позволяет спроектировать базовые элементы информационной модели СОТО: электронную структуру изделия РН «Союз-2» и электронную организационно-штатную структуру предприятий/организаций. При этом МПД должна позволять строить модели по различной информации: организационно-технической, технологической, измерительной. Известно, что многие процессы в СОТО на всех этапах его ЖЦ связаны с формированием документов как носителей организационно-технической информации о состоянии изделия. В цифровую эпоху наблюдается тенденция перехода от документов на бумажных носителях к электронным документам. Важной характеристикой электронного документа является наличие постоянно связанных с ним метаданных. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 15489-1–2007, «метаданные – это данные, описывающие контекст, содержание, структуру документов и управление ими» [15]. В рамках решаемой задачи модель документа была представлена в виде фрейма, атрибутами которого являются метаданные, а слоты задают отношения между ними.

В рассматриваемой ПрО МПД можно представить следующим образом:

$$M_D = \{Id, X^{Cl}, X^A, X^V, X^{St}, Cl, A, V, St\}, \quad (2)$$

где Id – конечное множество идентификаторов документов, $Id = id_i \mid i \in I_D, Id \in \mathbb{N}$;

X^{Cl} – конечное непустое множество классов документов, $X^{Cl} = \{x_j^{Cl} \mid j \in I_{X^{Cl}}\}$;

X^A – конечное непустое множество атрибутов документов, $X^A = \{x_k^A \mid k \in I_{X^A}\}$;

X^V – конечное множество значений атрибутов, значения могут быть любой природы, $X^V = \{x_n^V \mid n \in I_{X^V}\}$;

X^{St} – конечное множество статусов документов, $X^{St} = \{x_m^{St} \mid m \in I_{X^{St}}\}$;

Cl – функция отображения, ставящая в соответствие каждому документу определенный класс, $Cl: id_i \rightarrow x_j^{Cl}$;

A – функция отображения, ставящая в соответствие каждому классу некоторое подмножество атрибутов X_k^A , X_k^A разных классов могут пересекаться, $A: x_j^{Cl} \rightarrow X_k^A, X_k^A \in X^A$;

V – функция отображения, ставящая в соответствие каждому атрибуту x_k^A некоторое подмножество его значений X_n^V , X_n^V разных атрибутов могут пересекаться,

$$V: x_k^A \rightarrow X_n^V, X_n^V \in X^V;$$

St – функция отображения, ставящая в соответствие атрибуту и подмножеству его значений некоторый статус x_m^{St} , $St: \langle x_k^A, X_n^V \rangle \rightarrow x_m^{St}, x_m^{St} \in X^{St}$.

По описанной МПД ПрО может быть сформирована схема БД на основе одной из известных нотаций построения моделей «сущность – связь» [16, 17]: нотация Чена, Баркера, IDEF1X, UML, ORM, «объект – отображение». Следуя концепции «программирования без программирования», предложенной в работе [7], необходимо отметить, что известны подходы, позволяющие синтезировать БД по МПД ПрО. Таким образом, как БД, так и ПК, с ней взаимодействующий, могут быть синтезированы автоматически по спроектированным заранее вычислительным моделям и схемам баз данных.

Для реализации возможности манипулирования данными из ПК на уровне представления взаимодействия МПЗ и МПД необходимо сформировать некоторый язык запросов, позволяющий эксперту формировать выражения (модели) на этом языке, интерпретируемые как схемы программ получения, добавления и изменения данных в БД. Отметим, что в организациях, связанных с РН «Союз-2», используются БД, основанные на различных технологиях. В связи с этим существенным требованием к языку запросов является возможность описания моделей манипулирования данными, независимых от выбранных моделей данных (реляционной, иерархической, сетевой и т. д.) и технических особенностей БД.

Широкое распространение при создании БД получили реляционные модели данных, базирующиеся на реляционной алгебре Кодда [18]. Для взаимодействия с таким БД часто используется язык Structured Query Language (SQL) (и его диалекты, в зависимости от реализации конкретной системы управления БД). Язык SQL характеризуется в достаточной степени высоким уровнем для представления выражений, что обеспечивает его однозначность и понятность для экспертов ПрО. Кроме того технологии, использующие этот язык, предполагают возможность автоматического синтеза схем программ запросов. В то же время этот язык ограничен в своих выразительных возможностях правилами описания реляционных моделей данных. Однако для демонстрации автоматического синтеза схем программ запросов, актуальных в рассматриваемой задаче, можно привести следующий пример использования языка SQL. Для функции отображения $A: x_j^{Cl} \rightarrow X_k^A, X_k^A \in X^A$, ставящей в соответствие каждому классу документов некоторое подмножество атрибутов, может быть построено следующее выражение:

$$\begin{aligned} & SELECT attribute.name \\ & FROM Class, Attribute, class2attribute \\ & WHERE class.name = x_j^{Cl} \text{ AND } class.name = class2attribute.class_name \\ & \quad \text{AND } attribute.name = class2attribute.attribute_name \end{aligned} \quad (3)$$

Исполнение запроса предполагает преобразование указанного выражения в некоторое внутреннее представление, интерпретируемое для обработки на ЭВМ. В результате из рассмотрения полностью исключаются синтаксические конструкции, приближающие выражение к естественному языку [18, 19]. В общем виде запрос представляется средствами алгебры Кодда как некоторое реляционное выражение:

$$\pi_{name} \left(\left(\sigma_{name=x_j^{Cl}}(Class) \right) \bowtie_{name=class_name} class2attribute \right) \bowtie_{attribute_name=name} Attribute. \quad (4)$$

Затем строится синтаксическое дерево запроса, по которому могут быть определены семантические связи между реляционными операторами в явном виде [18]. Данное дерево по существу является схемой программы выполнения запроса (рис. 2).

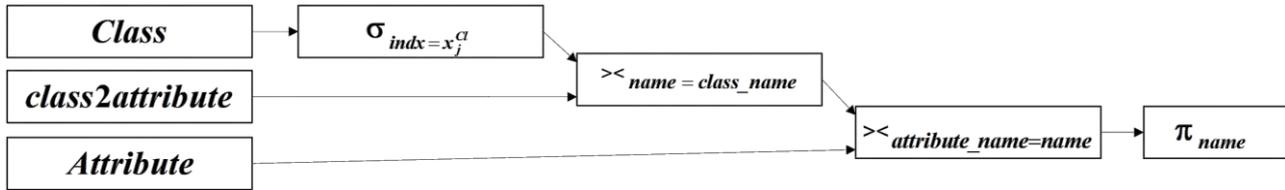


Рис. 2. Пример схемы программы запроса значений множества атрибутов документа по классу документа

В реляционных моделях данных между сущностями могут быть установлены только бинарные связи. Это приводит к тому, что схема программы выполнения запроса всегда представляет собой бинарное дерево.

Реляционные, иерархические и сетевые модели данных являются частным случаем графовых моделей [20]. Это утверждение позволяет говорить о возможности определения некоторой формальной грамматики и соответствующего языка запросов на графовых МПД, обеспечивающих принципиальную возможность построения схем программ для любой БД, независимо от модели данных. Такая возможность удовлетворяет заявленному ранее требованию, а такая МПД должна быть включена в комплекс моделей системы мониторинга ТС СОТО, поскольку элементы и подсистемы СОТО могут быть представлены сколько угодно сложными структурами, что, безусловно, определяет необходимость использования комплекса различных моделей данных, а значит, и унифицированного языка манипулирования данными.

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Важным требованием к системе мониторинга ТС СОТО является возможность моделирования информационного взаимодействия его территориально удаленных автономных подсистем, решающих свои частные задачи. Как уже было отмечено, методология формирования систем мониторинга состояния СОТО на основе G-моделей предполагает, в частности, использование теории агентного моделирования, применение которой позволит удовлетворить сформулированное требование.

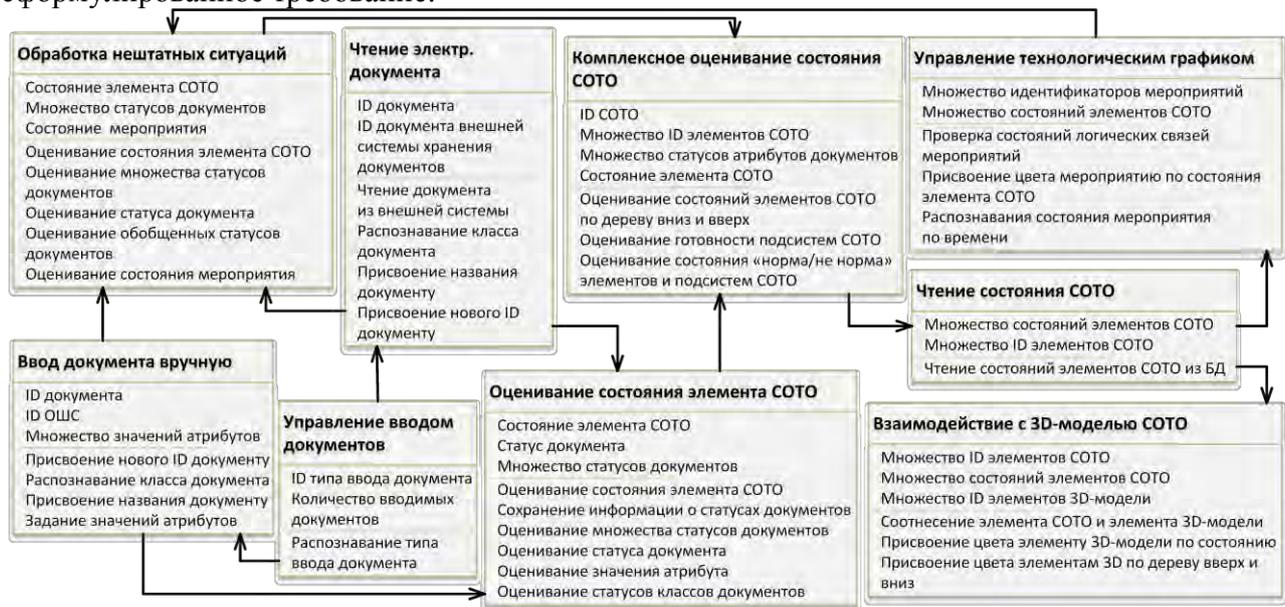


Рис. 3. Мультиагентная интерпретация системы мониторинга ТС СОТО по электронным документам

Таким образом, полимодельный комплекс, описывающий функционирование системы мониторинга ТС СОТО, может быть описан группой взаимодействующих интеллектуальных агентов. Так, например, для решения рассматриваемой в статье задачи была построена мультиагентная система, представленная на рис. 3 (агенты имеют вид сущностей в нотации UML). В ней реализуются механизмы кооперативного взаимодействия, в ходе которого обеспечивается формирование обобщенной оценки состояния СОТО. При этом каждому агенту назначены свои задачи за счет формализации извлекаемых у экспертов знаний в виде вычислительных моделей (вычислительных задач). Агенты связаны между собой отношениями инцидентности, т. е. по окончании выполнения своей задачи один агент активизирует другой за счет реализации потоковых вычислений в G-сетях.

В рассматриваемой интерпретации агентам соответствуют G-модели, что означает, что агентам назначены свои вычислительные задачи в терминах Э.Х. Тыугу [12]. Таким образом, каждый агент представлен множеством измеряемых и вычисляемых параметров и множеством операторов, на основе которых формируются значения вычисляемых параметров. Стоит отметить, что на рис. 3 представлено описание лишь некоторых основных параметров и операторов с целью сохранения наглядности.

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА СОТО

В качестве примера реализации одного из агентов приведем модель оценивания состояния элемента изделия (рис. 4). Получая на вход новый электронный документ, модель позволяет оценить состояние элемента СОТО, связанного с этим документом. Стоит отметить, что для реализации вычислений по заданной модели эксперт-аналитик должен задать дополнительную информацию в рамках БЗ (см. формулу (2)): возможные интервалы значений атрибутов X_n^V и связанные с ними статусы документов x_m^{St} , возможные наборы статусов документа и связанные с ними обобщенные статусы класса документов $s_{Cl}^{St} = \{M_{Cl}^{St}, st_{Cl}\}$, возможные наборы обобщенных статусов классов документов и связанные с ними оценки состояния изделия $m_{Cl}^{St^c} = \{St^c, s\}$.

Представленная модель нуждается в пояснении моделируемых в ней процессов. Ввод документа в систему сопровождается заданием идентификатора id' этого документа и значений $x^{V'}$ атрибутов $x^{A'}$. По каждому значению определяется статус документа x_m^{St} . В итоге документ приобретает множество статусов M_{id}^{St} . Далее определяется обобщенный статус документа st_{Cl} в результате поиска такого набора статусов M_{Cl}^{St} из наборов, заданных экспертом, который бы совпадал с M_{id}^{St} . Возможна ситуация, когда по каждому классу вносится несколько документов. В таком случае st_{Cl} будет добавлен к множеству $S_{Cl}^{St^c}$ всех обобщенных статусов документов данного класса. В результате операции объединения элементов множества $S_{Cl}^{St^c}$ будет получено обобщенное состояние класса документов st_{Cl}^c . При этом, если в частном случае область допустимых значений st_{Cl} представлена только $\{a, b\}$, то st_{Cl}^c будет представлено единственным значением из $\{a, b\}$. Далее для совокупности всех обобщенных статусов классов документов St^c необходимо найти такой набор St^c и связанную с ним оценку состояния элемента СОТО s из наборов, заданных экспертом, что $St^c = St^c$. Таким образом, в результате обработки и анализа метаданных документов может быть комплексно оценено состояние элемента СОТО.

Известно, что по сформированной G-модели в автоматическом режиме можно синтезировать соответствующую схему программы – G-сеть [7]. Однако остается открытым вопрос корректности сформированной программы. Можно показать ее верифицируемость и, соответственно, реализуемость. В работе [7] отмечено, что G-сеть верифицирована в случае, если

она обладает свойствами полноты, замкнутости и непротиворечивости. Эти свойства определены для выражений логики первого порядка, а также для моделей, построенных с их использованием [21]. В рассматриваемой ПрО модель будет обладать свойством полноты в случае, если в предикатных функциях задаваемые экспертом наборы значений параметров полностью покрывают область их допустимых значений. Так, например, совокупность задаваемых интервалов значений атрибутов X_n^V должны соответствовать всем возможным значениям X^V по всем атрибутам. Модель будет обладать свойством замкнутости в случае, если по каждому задаваемому экспертом набору значений, как импликант, задано такое отображение, что однозначно определено попадание в замкнутое множество допустимых значений. Например, для интервалов значений атрибутов X_n^V должен быть однозначно определен статус x_m^{St} в конечном множестве статусов документов X^{St} . Модель будет обладать свойством непротиворечивости, если при построении ДНФ по множеству импликант любых предикатных функций не будут найдены два параллельно заданных противоречивых предиката, имеющих значения *true* и *false*. Таким образом, верификация заданной модели обеспечивается корректностью заложенных в модель знаний эксперта.

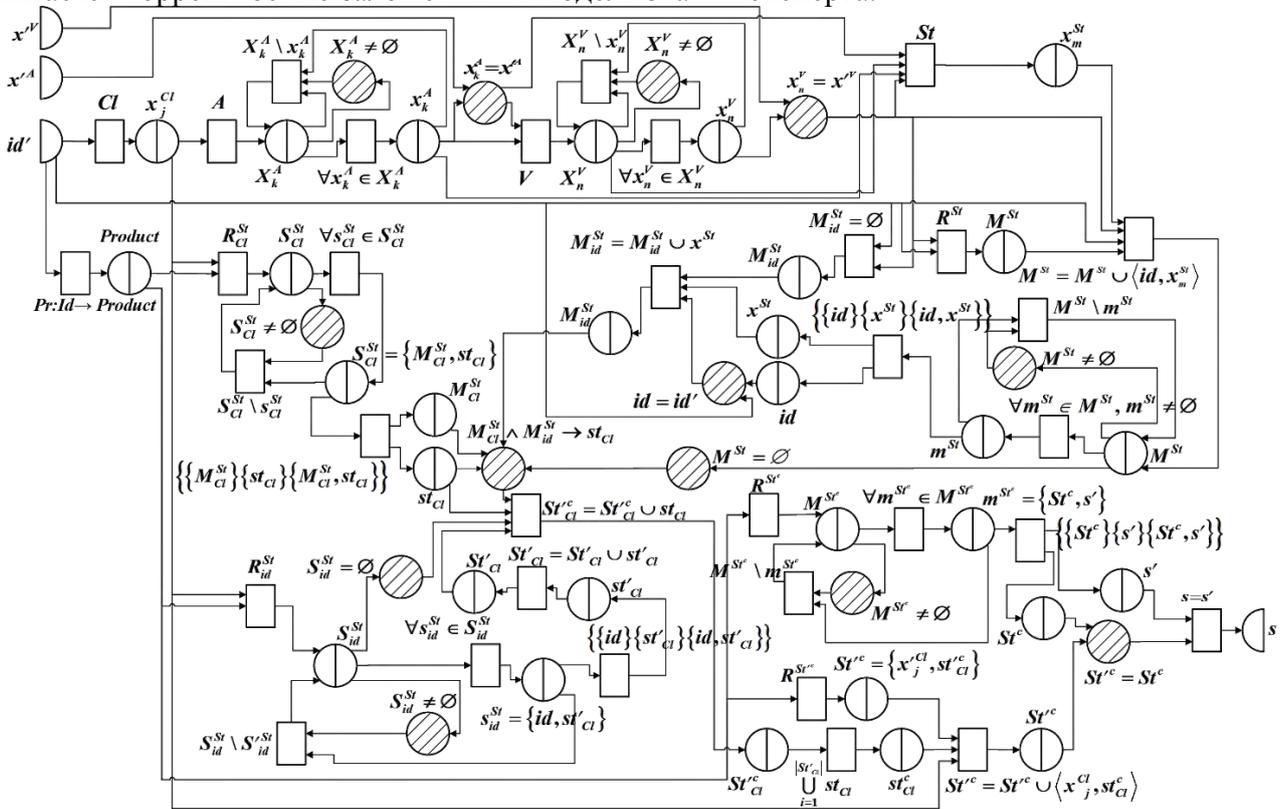


Рис. 4. Модель оценивания состояния элемента СОТО

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в статье системный анализ задачи оценивания и анализа ТС РН «Союз-2» на всех этапах ее ЖЦ показал необходимость применения новой ИИТ для автоматизированного проектирования систем мониторинга ТС РН «Союз-2». Представленный в статье комплекс моделей для описания и применения интеллектуальной системы мониторинга ТС РН «Союз-2» на всех этапах ее ЖЦ и синтеза соответствующего прикладного ПО указанной системы удовлетворяет требованиям, предъявляемым к решению задач оценивания и анализа ТС в ГОСТе «Система информации о ТС и надежности КК и входящих в их состав изделий».

Разработанный комплекс моделей позволяет говорить о том, что применение в составе указанной системы новой ИИТ обеспечивает возможности комплексного оценивания ТС СОТО, что отвечает целям и задачам ЛПП в рассматриваемой ПрО. В статье показано, что G-модель как разновидность ОВМ обладает рядом преимуществ при моделировании и оценивании структурной динамики СОТО. Направления дальнейшего исследования связаны с разработкой языка концептуального моделирования МПД и соответствующей БД, разработкой унифицированного языка представления знаний для манипулирования данными, хранимыми в БД и характеризующими текущее состояние РН «Союз-2», разработкой метода автоматизированного вывода комплекса G-моделей и соответствующих схем программ по концептуальной схеме мультиагентной системы. К настоящему времени на основе представленных в статье результатов исследований был разработан ПК мониторинга ТС СОТО с применением рассмотренной ИИТ.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СТ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№ 15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214), госзадания Министерства образования и науки РФ № 2.3135.2017/К, в рамках бюджетных тем № 0073–2018–0003, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-SBHE-JP, Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ.

Список используемых источников

1. Повышение эффективности системы информации о техническом состоянии и надежности ракетно-космических комплексов с использованием интеллектуальной информационной технологии мониторинга состояния и управления в реальном масштабе времени / А.Ю. Россиев, С.А. Заозерский, В.А. Каргин, П.А. Пикулев, А.Ю. Чуприков, В.Ю. Гамов // Труды международной научно-практической конференции АИТА-2011. – М.: ИПУ им. Трапезникова РАН, 2011. – С. 776–780.
2. Соколов Б.В., Охтилев М.Ю. Методологические и технологические основы создания и использования нового поколения систем управления жизненным циклом космических средств // Труды XVI международной молодежной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (cad/cam/pdm - 2016)». – СПб.: Аналитик, 2016. – С. 383–387.
3. Применение технологии поддержки принятия решений на различных этапах жизненного цикла космических средств в составе системы информации о техническом состоянии и надежности / П.Н. Автамонов, А.Д. Бахмут, А.В. Крылов, М.Ю. Охтилев, П.А. Охтилев, Б.В. Соколов // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения) / под общ. ред. А.Н. Кирилина. – Самара: СамНЦ РАН, 2017. – С. 222–233.
4. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с. – (Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения).
5. Актуальные научно-технические проблемы разработки и внедрения взаимосвязанного комплекса унифицированных интегрированных систем поддержки принятия решений (СППР) в АСУ объектами военно-государственного управления / П.Н. Автамонов, М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Известия Южного федерального университета.

Технические науки. – Вып. № 3 (152). – Ростов-н/Д: Южный федеральный университет, 2014. – С. 14–27.

6. *Соловьев И.В.* Общие принципы управления сложной организационно-технической системой // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 2 (8). – С. 21–27.

7. *Охтилев М.Ю.* Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа. – СПб: ВИКУ им. Можайского, 1999. – 161 с.

8. Применение модифицированной сети Петри при решении задачи автоматизированной поддержки принятия решений по управлению сложной организационно-технической системы / А.Д. Бахмут, А.В. Крылов, П.А. Охтилев, И.С. Кириллов // Сб. докл. научной сессии ГУАП: в 3 ч. – СПб.: ГУАП, 2017. – Ч. 2: Технические науки. – С. 185–191.

9. *Крылов А.В., Охтилев П.А., Бахмут А.Д.* Использование прецедентной методологии при построении экспертных систем управления сложными организационно-техническими объектами // Сб. докл. научной сессии ГУАП: в 3 ч. – СПб.: ГУАП, 2017. – Ч. 2: Технические науки. – С. 255–261.

10. *Охтилев П.А., Бахмут А.Д., Крылов А.В.* Обзор и применение моделей представления знаний в интеллектуальной системе мониторинга структурных состояний сложных организационно-технических объектов // Сб. докл. научной сессии ГУАП: в 3 ч. – СПб.: ГУАП, 2017. – Ч. 2: Технические науки. – С. 266–277.

11. *Нариньяни А.С.* Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии // Информационные технологии. – 1997. – № 4. – С. 11–16.

12. *Тьугу Э.Х.* Концептуальное программирование. – М.: Наука, 1984. – 255 с. – (Проблемы искусственного интеллекта).

13. *Поспелов Д.А.* Искусственный интеллект: справочник: в 3 кн. – М.: Радио и связь, 1990. – Кн. 2: Модели и методы. – 304 с.

14. *Гущин А.Н.* Основы представления знаний: учебное пособие. – СПб.: БГТУ, 2007. – 31 с.

15. *Ларин М.В.* Электронные документы: вопросы теории и практики // Вестник РГГУ. Сер.: Документоведение и архивоведение. Информатика. Защита информации и информационная безопасность. – М.: РГГУ, 2015. – № 2 (145). – С. 53–63.

16. *Пин-Шен Чен П.* Модель «сущность – связь» – шаг к единому представлению о данных / пер. с англ. М.Р. Когаловского // Системы управления базами данных. – Вып. №3. – М.: Открытые системы, 1995. – С. 137–158.

17. *Кузнецов С.Д.* Базы данных. Вводный курс. – URL: http://citforum.ru/database/advanced_intro/ (дата обращения: 05.12.2018).

18. *Дейт К. Дж.* Введение в системы баз данных: пер. с англ. – 8-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 1328 с.

19. *Грей П.* Логика, алгебра и базы данных / пер. с англ. Х.И. Килова, Г.Е. Минца; под ред. Г.В. Орловского, А.О. Слисенко. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

20. *Фаулер М., Садаладж П.* NoSQL: новая методология разработки нереляционных баз данных: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2013. – 192 с.

21. *Гильберт Д., Аккерман В.* Основы теоретической логики / пер. с англ. А.А. Ерофеева; под ред. С. Яновской. – 2-е изд. – М.: КомКнига, 2010. – 306 с.

П.Ю. Бугайченко,
кандидат военных наук
А.И. Данилов,
кандидат техн. наук, доцент;
А.М. Зубачёв,
кандидат военных наук;

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ И ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предлагается динамическая модель оценивания качества процессов подготовки и применения сложной технической системы. Моделирование осуществляется с применением усовершенствованного размеченного графа и рассматривается в рамках случайных марковских процессов с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. Представлены модифицированный размеченный граф и система дифференциальных уравнений, численное решение которых позволяет вычислить вероятностно-временные показатели качества подготовки и применения сложной технической системы, обсуждаются результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: модель, система, отказ, вероятность, интенсивность, граф.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной чертой современных сложных технических объектов и систем (СТС) является то, что при создании они, прежде всего, должны быть ориентированы на функционирование не только в нормальных, но и в критических (кризисных) условиях. Это обусловлено, с одной стороны, возрастанием угроз, вызванных техногенными, природными и человеческими факторами, с другой – желанием использовать уже существующие СТС для решения новых более сложных задач.

Для определения возможности реализации всех операций (работ), связанных с технологическим циклом управления, на заданном временном интервале применяют математическое моделирование. Математической базой, как правило, являются теория марковских и немарковских случайных процессов и теория массового обслуживания (ТМО), позволяющие решать разнообразные задачи анализа и синтеза СТС путем определения технико-экономических показателей эффективности функционирования систем в целом при известных технических параметрах их элементов и рабочей нагрузке. Широкою известность приобрели фундаментальные работы А. Клейнрока, С.А. Майорова, Т.И. Алиева, Г.И. Новикова, Д. Феррари, О.И. Авена, Я.И. Когана, В.М. Вишневого и других авторов по теории вычислительных систем и компьютерных сетей, использующие ТМО. С помощью моделей ТМО рассчитываются вероятностно-временные характеристики функционирования центральных процессоров и узлов коммутации, выполняется расчет потерь данных и загрузки линий связи, анализ буферной памяти и алгоритмов маршрутизации, решения пакета задач, необходимых для выдачи управляющего воздействия, и т. п.

Большинство авторов используют модели ТМО в предположении, что очередь заявок бесконечна, существует стационарный режим, а коэффициент загрузки не превышает единицы. Однако наибольший практический и теоретический интерес представляют модели ТМО, учитывающие поведение СТС в контуре управления технологическими процессами и объектами, функционирующих в условиях перегрузок на заданном (директивном) временном интервале. В работах А.Я. Хинчина, К. Такача, Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко, Ю.В. Прохорова, И.Ч. Ежова, Е. Рейча положено начало «нестационарной» ТМО. Ряд результатов исследования моделей ТМО, параметры которых зависят от состояния системы, получены в работах Г.Л. Арсенишвили, Л.М. Абольникова. Некоторые характеристики однолинейных систем

массового обслуживания с ординарным входящим потоком, интенсивность которого обратно пропорциональна величине очереди, рассмотрены в работах Б. Конолли и Н. Хидиди. В дальнейшем появились работы таких авторов, как А.И. Ляхова, Г. П. Климова, Б.В. Травоженко, Я. Стрик, Н. Greenberg, E. Leese, P. Leguesdron, M.F. Neuts, R.R. Read, R. Syshi, Н.И. Головки, А.И. Зефмана, посвященные анализу и расчету нестационарных вероятностных характеристик моделей ТМО с постоянными интенсивностями входящего потока и обслуживания с бесконечными или конечными накопителями. Анализ результатов, полученных в рассматриваемых работах, показывает, что точное исследование протекающих в моделях ТМО процессов при поступлении на вход потока заявок с изменяющейся интенсивностью в нестационарном режиме чрезвычайно трудно даже при экспоненциальных законах распределения вероятностей. Недостаточно хорошо изучено поведение нестационарных систем обслуживания (НСО) с более общими предположениями о законах распределения времени между моментами поступления и обслуживания заявок. Любой учет особенностей, присущих реальным СТС (пиковые нагрузки, приоритетность, порядок выбора заявок из очереди на обслуживание, доступность и возможные отказы каналов, отличие законов распределения временных интервалов от экспоненциального и т. п.) в математических моделях нестационарных систем массового обслуживания, в свою очередь, усложняет порядок расчета вероятностно-временных характеристик процесса обслуживания заявок. Таким образом, существует противоречие между практической потребностью в решении задач анализа и прогнозирования качества функционирования реальных СТС в условиях реальной рабочей нагрузки и ограниченными возможностями существующих моделей.

Указанные обстоятельства определяют актуальность предлагаемой в данной статье решение задачи: анализа и прогнозирования реализации изменяющейся рабочей нагрузки СТС на заданном временном интервале.

Объект исследования: СТС с определенной структурой и известными техническими параметрами ее элементов, имеющая изменяющуюся рабочую нагрузку на заданном временном интервале.

Предмет исследования и разработки – математическая модель нестационарной системы обслуживания с конечным источником заявок и алгоритм расчета вероятностно-временных характеристик. Модель СТС разрабатывается с целью повышения точности моделирования и осуществляется в рамках случайных марковских процессов с дискретным множеством состояний и непрерывным временем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наибольший практический интерес представляют модельные исследования СТС, содержащих в своем составе информационный управляющий комплекс (ИУК) и автоматическую систему контроля (АСК) технического состояния, поскольку такие СТС составляют основу систем управления различного назначения. Наличие АСК позволяет оперативно обнаруживать отказы и переключать рабочие объемы (в простейшем случае – комплекты или каналы) аппаратуры.

В наиболее общем случае система резервирования автоматизированной СТС должна удовлетворять следующим положениям:

- резервирование СТС осуществляется дублированием комплектов ее аппаратуры;
- резервный комплект аппаратуры находится в ненагруженном режиме ожидания;
- основной и резервный комплекты аппаратуры СТС равнонадежны;
- наработка до отказа комплекта аппаратуры СТС подчинена экспоненциальному закону распределения;
- время восстановления аппаратуры СТС имеет экспоненциальное распределение;

– контрольно-переключающее устройство резервируемых объемов аппаратуры СТС в составе АСК ИУК работает безотказно.

Необходимо определить показатели качества функционирования СТС (вероятность достижения цели операции по подготовке и применению СТС, вероятность недостижения цели операции по подготовке и применению СТС) в целом при известных технических параметрах их элементов и рабочей нагрузке: временные интервалы выполнения всех работ имеют экспоненциальные распределения с интенсивностями λ_i ; вероятность обнаружения отказов при выполнении работ ω_i ; время устранения обнаруженных отказов распределено по экспоненциальному закону с интенсивностями μ_i . Процесс подготовки СТС к применению состоит из выполнения $N-1$ работы (операции), последней операцией является применение СТС по своему предназначению.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ И ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Представим процессы (операции, работы) подготовки и применения СТС нестационарной марковской системой обслуживания с дискретным множеством состояний и непрерывным временем, как мы это делали в работах [1–7]. Ориентированный взвешенный граф вершина – событие (дуга – работа), представлен на рис. 1. При составлении графа учитывалось, что все работы (включение основного и резервного комплектов СТС, их подготовка к применению, применение СТС на основном и резервном комплектах) выполняются последовательно.

Таким образом, подготовка и применение СТС может содержать не более N работ (операций), при выполнении каждой из которых может быть обнаружен отказ основного или резервного комплекта СТС. При этом отказы комплектов СТС и их восстановление могут трактоваться в самом широком смысле (от сбоев и отказов технических средств до влияния человеческого фактора на качество подготовки и применения СТС). Общим для таких «отказов» является свойство делать невозможным выполнение операций до их устранения.

Временные интервалы выполнения всех работ имеют экспоненциальные распределения с интенсивностями $\{\omega_1\lambda_1, \omega_2\lambda_2, \dots, \omega_N\lambda_N\}$ при обнаружении отказа, зависящими от номера работы (а значит, и от номера отказа) и значений соответствующих вероятностей их обнаружения $\omega_i, i=1, N$. В случае отсутствия отказа СТС осуществляется переход по соответствующим дугам с интенсивностями $\{(1-\omega_1)\lambda_1, (1-\omega_2)\lambda_2, \dots, (1-\omega_N)\lambda_N\}$. На рис. 1 используются обозначения $(1-\omega_i) = \bar{\omega}_i$. Время устранения обнаруженных отказов распределено по экспоненциальному закону с интенсивностями $\mu_i, i=1, N-1$.

Состояния (i, j) такой системы в каждый момент времени будем характеризовать количеством обнаруженных (и еще не устраненных) отказов $i, i=0, 1$, и числом выполненных операций $j (j=0, N)$. Вероятности пребывания системы в этих состояниях обозначим $P_{i,j}(t)$.

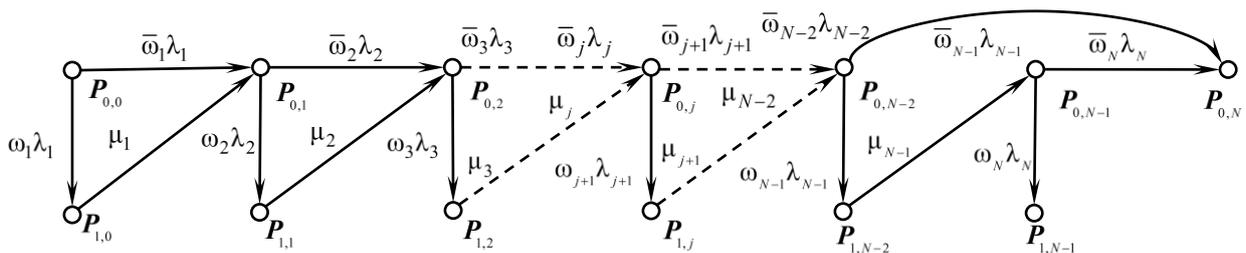


Рис. 1. Ориентированный граф процесса подготовки и применения СТС

Как видно из рис. 1, в таком представлении общее число состояний графа равно $N_c=2N+1$. Процессы в рассматриваемой марковской модели описываются системой из N_c дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{i,j}(t)}{dt} = & -\delta(N-j-Ni)P_{i,j}(t)\lambda_{j+1} + \delta(i)P_{i-1,j}(t)\omega_{j+1}\lambda_{j+1} - \delta(i)\delta(N-1-j)P_{i,j}(t)\mu_{i+1} + \\ & + \delta(j(1-i))[\delta(N-j)P_{i+1,j-1}(t)\mu_j + \delta(N-1-j)P_{i,j-1}(t)(1-\omega_j)\lambda_j] + \\ & + \delta(1-i)\delta(j-N-1)P_{0,N-2}(t)(1-\omega_{N-1})\lambda_{N-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\delta(m) = \begin{cases} 1, & \text{если } m > 0 \\ 0, & \text{если } m \leq 0 \end{cases}, i = 0, 1; j = \overline{0, N}.$

Для каждого момента времени t должно соблюдаться условие нормировки вида $\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^N P_{i,j}(t) = 1$. Задав начальные условия к системе уравнений в виде $P_{i,j}(0) = \begin{cases} 1, & \text{если } i+j=0; \\ 0, & \text{если } i+j \neq 0, \end{cases}$ можно найти численное решение соответствующей задачи Коши для произвольного значения времени t . Используя решение предложенной системы (1), можно получить ряд важных вероятностных показателей процессов подготовки и применения СТС.

Вероятность достижения цели операции по подготовке и применению СТС

$$R_{\text{ДЦ}}(t) = P_{0,N}(t). \quad (2)$$

Вероятность недостижения цели операции по подготовке и применению СТС

$$R_{\text{НДЦ}}(t) = P_{1,N-1}(t). \quad (3)$$

Таким образом, оценивание качества подготовки и применения СТС проводится на основании принятых критериев оценивания. При полном выполнении программы подготовки и применения СТС полагается, что цели операции достигнуты. При наличии отклонений от программы подготовки и применения СТС с учетом значимости невыполненных или выполненных с отклонениями режимов результаты функционирования СТС определяются как «цель операции не достигнута» (например, при отказе основного, а затем и резервного комплектов СТС при ее применении по назначению).

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Предложенная модель позволяет рассчитать вероятностные показатели процессов подготовки и применения СТС, представленные формулами (2), (3), выработать практические рекомендации по прогнозированию качества подготовки и применения существующих и перспективных СТС, научно обосновать пути совершенствования технологии их применения в целом. Для иллюстрации таких возможностей приведем результаты расчета показателей

качества процессов подготовки и применения СТС. Расчеты выполнены по формулам (2), (3) для следующих исходных данных. Цикл подготовки и применения СТС состоит из шести работ со средними длительностями их проведения: 0,5; 0,5; 1,0; 1,0; 0,17; 0,17 (ч). Размеченный ориентированный граф вершина – событие (дуга – работа) процесса подготовки и применения СТС для принятых исходных данных представлен на рис. 2, а описание содержания работ, их обозначения и обозначения интенсивностей переходов представлены в табл. 1.

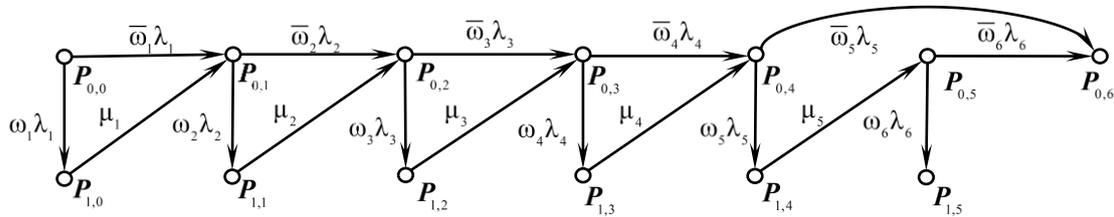


Рис. 2. Размеченный ориентированный граф процесса подготовки и применения СТС для принятых исходных данных

Таблица 1

Описание содержания работ, их обозначения и обозначения интенсивностей переходов

Обозначение работы	Интенсивности выполнения работ	Описание работ, изменяющих состояния системы
A_1	λ_1	Включение основного комплекта СТС
A_2	λ_2	Включение резервного комплекта СТС
A_3	λ_3	Подготовка к применению основного комплекта СТС
A_4	λ_4	Подготовка к применению резервного комплекта СТС
A_5	λ_5	Применение СТС основным комплектом
A_6	λ_6	Применение СТС резервным комплектом

Как видно из рис. 2, в таком представлении общее число состояний графа равно $N_c = 13$. Процессы в рассматриваемой марковской модели описываются системой из 13 дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{i,j}(t)}{dt} = & -\delta(6-j-6i)P_{i,j}(t)\lambda_{j+1} + \delta(i)P_{i-1,j}(t)\omega_{j+1}\lambda_{j+1} - \delta(i)\delta(5-j)P_{i,j}(t)\mu_{i+1} + \\ & + \delta(j(1-i))[\delta(6-j)P_{i+1,j-1}(t)\mu_j + \delta(5-j)P_{i,j-1}(t)(1-\omega_j)\lambda_j] + \\ & + \delta(1-i)\delta(j-5)P_{0,4}(t)(1-\omega_5)\lambda_5, \end{aligned}$$

где $\delta(m) = \begin{cases} 1, & \text{если } m > 0 \\ 0, & \text{если } m \leq 0 \end{cases}, i = 0, 1; j = \overline{0, 6}.$

Распределение времени устранения каждого отказа имеет экспоненциальное распределение с интенсивностями: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 1$; $\mu_5 = 12$ (1/ч). Значения вероятностей обнаруже-

ния отказов при выполнении работ составляют: $\omega_1 = \omega_2 = 0,03$; $\omega_3 = \omega_4 = 0,06$; $\omega_5 = \omega_6 = 0,01$. На рис. 3 представлены графики (нижние сплошные кривые) изменения вероятностных показателей $R_{\text{ДЦ}}(t) = P_{0,6}(t)$, $R_{\text{НДЦ}}(t) = P_{1,5}(t)$ соответственно от времени выполнения работ, составляющих стандартный цикл подготовки и применения СТС. Расчеты показывают, что эти показатели к моменту времени, например, $t = 4$ часа принимают соответственно следующие значения: $0,708$ и $7E-5$. Улучшение этих показателей возможно за счет уменьшения времени выполнения работ (прежде всего подготовительных работ A_1, A_2, A_3, A_4), увеличения интенсивности устранения отказов, уменьшения вероятностей обнаружения отказов или увеличения времени на проведение цикла управления (времени моделирования). При увеличении цикла подготовки и применения СТС, например, до шести часов показатели имеют следующие значения: $R_{\text{ДЦ}}(t) = 0,924$, $R_{\text{НДЦ}}(t) = 9E-5$. Если же потребуется уменьшить продолжительность стандартного цикла подготовки и применения СТС, например, до трех часов, то получим значения показателей $R_{\text{ДЦ}}(t) = 0,489$, $R_{\text{НДЦ}}(t) = 4E-5$.

На рис. 3 также представлены графики (верхние пунктирные кривые) вероятностных показателей $R_{\text{ДЦ}}(t) = P_{1,06}(t)$, $R_{\text{НДЦ}}(t) = P_{1,15}(t)$ соответственно, вычисленные при удвоенных интенсивностях выполнения работ A_1, A_2, A_3, A_4 . Такие зависимости показателей от параметров, определяющих условия задачи (λ, ω, μ, t), могут использоваться для принятия научно обоснованных решений по совершенствованию технологии подготовки и применения существующих и перспективных СТС.

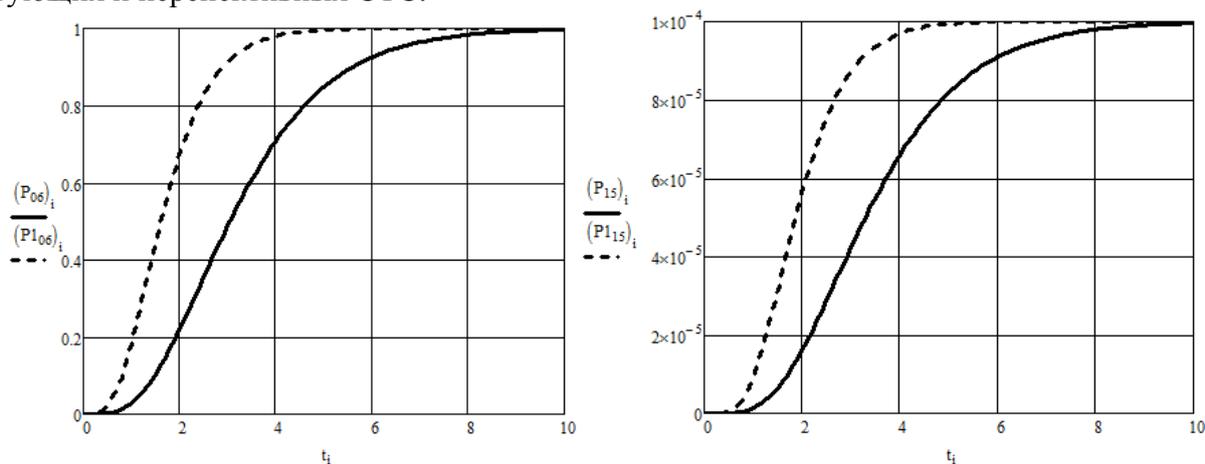


Рис. 3. Графики показателей $R_{\text{ДЦ}}(t) = P_{0,6}(t)$, $P_{1,06}(t)$ и $R_{\text{НДЦ}}(t) = P_{1,5}(t)$, $P_{1,15}(t)$, $t = \overline{0, 10}$ [ч]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель позволяет получать данные о зависимостях показателей от параметров, определяющих условия задачи (λ, ω, μ, t), и на основании используемых критериев принимать научно обосновывать решения по совершенствованию технологии подготовки и применения существующих и перспективных СТС. Оценивание качества выполнения задач подготовки и применения СТС проводится с учетом значений таких вероятностных показателей, как «вероятность достижения цели операции по подготовке и применению СТС», «вероятность недостижения цели операции по подготовке и применению СТС». При этом так как подготовка и применение СТС происходит под воздействием внешних и внутренних случайных факторов (отказы (сбои) аппаратуры, надежность программных средств, влияние человеческого фактора, возникновение нештатных ситуаций или изменение обстановки, нештатные режимы функционирования смежных технических средств, взаимодействующих с СТС), то отказы комплектов СТС и их восстановление могут трактоваться в самом широком

смысле. Общим для таких «отказов» является свойство делать невозможным выполнения (продолжения) операций до их устранения.

Модели подготовки и применения СТС могут находить применение при проведении исследований по выявлению временных резервов в случае возникновения отказов различного типа и поиску путей их рационального использования дежурной сменой СТС.

При разработке модели учитывалось, что все работы (включение основного и резервного комплектов СТС, их подготовка к применению, применение на основном и резервном комплектах) выполняются последовательно. Однако возможны и другие варианты выполнения этих работ (операций):

- одновременное (параллельное) включение (подготовка) основного и резервного комплектов СТС (возможно только при задействовании двух расчетов);
- последовательное включение (подготовка) основного и резервного комплектов СТС с последовательным устранением возможных отказов;
- различные комбинации этих вариантов при реализации операций по включению и подготовке комплектов СТС.

Реализация всех этих вариантов модели вполне возможна с применением использованного подхода в рамках случайных марковских процессов с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. Наличие комплекса таких нестационарных моделей позволяет не только рассчитать значения вероятностных показателей (2), (3) для каждой из них, но выбрать наилучшую стратегию организации подготовки и применения существующих и перспективных СТС, исходя из наличия или отсутствия необходимых ресурсов, времени, статистических данных, распределить работы между расчетами дежурной смены СТС.

Список используемых источников

1. Данилов А.И., Данилов А.А. Нестационарные модели процессов испытаний программных средств в условиях риска // Сб. статей Второй Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб., 2014. – С. 199–202.

2. Хомоненко А.Д., Данилов А.И., Данилов А.А. Нестационарные модели стратегий испытаний программных средств при вероятностных параметрах обнаружения ошибок // Информационно-управляющие системы. – 2015. – Вып. 4. – С. 50–58.

3. Хомоненко А.Д., Данилов А.И., Данилов А.А. Динамические модели испытаний программных средств // Сб. докладов 18-й Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. – СПб., 2015. – Т.1. – С. 239–242.

4. Данилов А.И., Данилов А.А. Динамические модели испытаний программных средств с двумя типами ошибок // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб., 2015. – Вып. 647. – С. 12–21.

5. Нестационарные модели отладки программ с распределением Кокса длительности исправления ошибок / А.Д. Хомоненко, А.И. Данилов, А.А. Данилов, П.В. Герасименко // Сб. докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2016). – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 163–166.

6. Хомоненко А.Д., Данилов А.И., Данилов А.А. Динамические модели отладки программ с вероятностным обнаружением ошибок и распределением Эрланга длительности их исправления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 655–662.

7. Данилов А.И., Данилов А.А. Методика численного анализа эффективности отладки программных средств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 543–551.

В.С. Гончаревский,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор техн. наук, профессор

ОСОБЕННОСТИ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМНЫМ МАНЕВРОМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ СТЫКОВКИ С ОРБИТАЛЬНЫМИ СТАНЦИЯМИ

В статье анализируются особенности и способы управления взаимным маневром космических аппаратов при выполнении операции стыковки с орбитальными станциями, оборудованными несколькими стыковочными узлами для двух практически важных случаев. В первом случае предполагается, что на орбитальной станции (ОС) возможно выполнение встречной ориентации (ориентации оси заданного стыковочного узла по направлению на транспортный корабль (ТК), то есть по направлению линии визирования ОС–ТК). Второй практически важный случай соответствует ситуации, когда встречная ориентация на ОС отсутствует. Рассматриваются особенности использования методов сближения относительно линии визирования и методов свободных траекторий для выполнения взаимного маневра в этих двух случаях.

Ключевые слова: орбитальная станция, взаимный маневр, линия визирования, стыковочный узел, относительное движение.

Для обеспечения длительного функционирования орбитальных станций (ОС) необходимо постоянное обслуживание их с помощью пилотируемых или беспилотных транспортных кораблей (ТК). Эти корабли обеспечивают периодическую смену экипажей ОС, доставку на них членов экспедиций посещения, снабжение продуктами жизнеобеспечения, доставку оборудования, приборов, топлива и других расходуемых материалов. С помощью ТК можно также осуществить спасение экипажей ОС в аварийных ситуациях.

Для решения перечисленных задач ТК должен выполнять взаимный маневр (ВМ), включающий в себя в общем случае такие его разновидности как сближение, облет, зависание и причаливание [1–16]. ВМ завершается стыковкой ТК с ОС, которая обычно в процессе его осуществления не изменяет траекторию движения своего центра масс. Таким образом, она играет роль пассивного аппарата (ПА), а транспортный корабль – роль активного аппарата (АА). Существующие ОС оборудованы, как правило, несколькими стыковочными узлами. Не вызывает сомнений, что эта тенденция сохранится и в дальнейшем. Поэтому представляет интерес рассмотрение особенностей и способов управления ВМ, выполняемого ТК для стыковки с ОС такого типа.

Проанализируем эти особенности и способы для двух практически важных случаев.

Наличие встречной ориентации ОС и ТК. В данном случае на ОС возможно выполнение встречной ориентации (ориентации оси заданного стыковочного узла по направлению на ТК, то есть по направлению линии визирования ОС–ТК). В такой ситуации реализация методов сближения вдоль линии визирования (ЛВ) связана с разворотом ОС вокруг центра масс до тех пор, пока ось этого узла не займет угловое положение, совпадающее с направлением ЛВ в конце этапа ликвидации начальной угловой скорости ЛВ и создания требуемой скорости сближения вдоль этой линии. Далее маневр выполняется согласно классической схеме сближения вдоль ЛВ при встречной ориентации продольной оси ТК и оси заданного стыковочного узла ОС. Недостатком рассмотренного способа управления являются повышенные энергозатраты (ЭЗ) на выполнение ВМ. Однако этот недостаток можно в значительной степени устранить, если производить сближение вдоль ЛВ, занимающей оптимальное угловое положение [6, 8]. Особенность выполнения маневра тогда будет заключаться в том, что в конце этапа ликвидации начальной угловой скорости ЛВ ТК должен выйти на указанное оптимальное направление. В этом же направлении необходимо сориентировать и ось заданного

стыковочного узла ОС. Если же в рассматриваемом случае для выполнения ВМ используются методы свободных траекторий (МСТ), то анализ траекторий относительного движения (ОД), соответствующих этим методам, показывает, что ТК подходит к ОС со вполне определенного направления. Оно может быть найдено заранее, уже в момент начала маневра. Его числовой характеристикой в опорной системе отсчета, по осям которой осуществлена ориентация строительных осей ОС, может служить величина угла подхода.

При компланарном сближении и в случае круговой орбиты ОС угол подхода β_k определяется в случае ориентации ОС в орбитальной относительной системе координат (ОСК) x_B, y_B, z_B , связанной с местной вертикалью, соотношением [7, 8]

$$\operatorname{tg} \beta_k = \frac{(4 \sin T - 3T) \operatorname{tg} \beta_0 - 2(1 - \cos T)}{2(1 - \cos T) \operatorname{tg} \beta_0 + \sin T},$$

где β_0, β_k – начальное и конечное угловое положение ТК относительно местного горизонта;

T – безразмерное время выполнения ВМ, связанное с реальным временем T^* соотношением $T = \omega T^*$ (ω – угловая скорость обращения ОС вокруг планеты).

Видно, что зная β_0 и T , можно заранее рассчитать угол подхода β_k и развернуть ОС в это угловое положение к моменту стыковки. На рис. 1–4 представлены зависимости угла β_k от времени T и угла β_0 , а на рис. 5 и 6 – зависимость энергозатрат $\bar{v}_{p1} = V_{p1} / R_0$ от угла подхода при использовании двухимпульсного МСТ. Здесь R_0 – начальная дальность между ТК и ОС. Рис. 1, 2, 5 соответствуют ориентации ОС в орбитальной ОСК x_B, y_B, z_B , а рис. 3, 4, 6 – ориентации ОС в невращающейся ОСК x_n, y_n, z_n . Анализ графиков показывает, что для каждого значения T имеются углы β_k , при которых параметр \bar{v}_{p1} минимален. Отметим, что при близких к круговым начальных орбитах ОС и ТК абсолютно оптимальные с точки зрения ЭЗ значения угла $\beta_{k3} = 180^\circ$ (орбита ТК – внутренняя) и $\beta_{k3} = 0^\circ$ (орбита ТК – внешняя) имеют место при $T = \pi$, что соответствует оптимальным хомановским маневрам.

Для определения угла β_{k3} , на который необходимо развернуть корпус ОС, требуется иметь информацию о начальном направлении β_0 . Она может быть получена либо непосредственно на борту ОС при наведении на себя, либо по каналу связи с борта ТК при самонаведении его на ОС.

Отсутствие встречной ориентации ОС и ТК. Данный практически важный случай соответствует ситуации, когда встречная ориентация на ОС отсутствует. Здесь возможны два основных способа реализации методов сближения вдоль ЛВ. В первом из них на участке дальнего сближения маневр выполняется аналогично случаю наличия встречной ориентации, а на участке причаливания осуществляется дополнительный маневр облета для выхода на направление оси заданного стыковочного узла и последующего сближения вдоль этого направления. Отличительной чертой второго способа является выход ТК на указанное направление в конце этапа ликвидации начальной угловой скорости ЛВ, а затем сближение и причаливание вдоль этого направления вплоть до момента стыковки. Достоинство этого способа – отсутствие дополнительного маневра облета на участке причаливания, в то время как к достоинствам первого способа следует отнести возможность выполнения сближения с меньшими ЭЗ.

При использовании МСТ в случае отсутствия встречной ориентации ОС могут быть предложены также два способа управления. Если по условиям выполнения операции время и момент начала ВМ строго фиксированы, то управление на участке дальнего сближения ведется таким образом, чтобы в его конце ТК попал в заданную конечную точку на линии причаливания к выбранному стыковочному узлу. Далее сближение производится вдоль этой линии. Вывод ТК в указанную точку обеспечивается соответствующим выбором параметров первого программного импульса управления. Если к моменту расчета этого импульса номер стыковочного узла, к которому необходимо осуществить причаливание, а, следовательно, и

координаты конечной точки неизвестны, то программное управление формируется таким, чтобы траектория сближения прошла через начало ОСК, совпадающее с центром масс ОС. Тогда попадание ТК в заданную точку линии причаливания может быть обеспечено одним из заключительных корректирующих импульсов управления при условии, что к моменту его расчета выбор номера стыковочного узла уже произведен.

В тех ситуациях, когда ОС ориентирована в ОСК, направление осей которой на борту ТК неизвестно, расчет координат конечной точки участка дальнего сближения может быть выполнен только тогда, когда каким-либо образом будет определена истинная ориентация ОС. Для этой цели может быть предусмотрен, например, специальный радиоканал связи между ОС и ТК, предназначенный для передачи телеметрической информации об ориентации ОС, а также для обмена другими видами информации между ними в процессе выполнения ВМ. При наличии такого радиоканала и соответствующих телеметрических датчиков положение оси стыковочного узла становится известным, и координаты конечной точки траектории могут быть рассчитаны. Далее процесс управления аналогичен описанному ранее.

Второй способ управления может быть предложен, когда длительность и момент начала ВМ не фиксированы жестко и имеется возможность их варьирования в определенных пределах. Здесь при формировании первого программного импульса управления можно, используя, например, графики на рис. 1–6, подобрать такие требуемые значения параметров T и β_0 , при которых угол подхода $\beta_k = \beta_y$, где β_y – угол, характеризующий положение заданного стыковочного узла в опорной системе отсчета. Например, если заданный стыковочный узел находится на продольной оси передней (по отношению к направлению орбитального движения) части корпуса ОС, то есть $\beta_y = 180^\circ$, то такими значениями будут $T = \pi$ и $\beta_0 \approx -23^\circ$ (для орбитальной ОСК), то есть начальные условия хомановского сближения. Если $\beta_y = 90^\circ$, то требуемый угол β_k в орбитальной ОСК можно обеспечить, например, при $T = 1$ и $\beta_0 = 138^\circ$ или при $T = 2$ и $\beta_0 = 163^\circ$, а в невращающейся ОСК – при $T = 2$ и $\beta_0 = -116^\circ$ или $T = \pi$ и $\beta_0 = 0^\circ$ и т. д. При выборе значений параметров T и β_0 необходимо также учитывать требования по ЭЗ, характеризуемыми графиками на рис. 5 и 6.

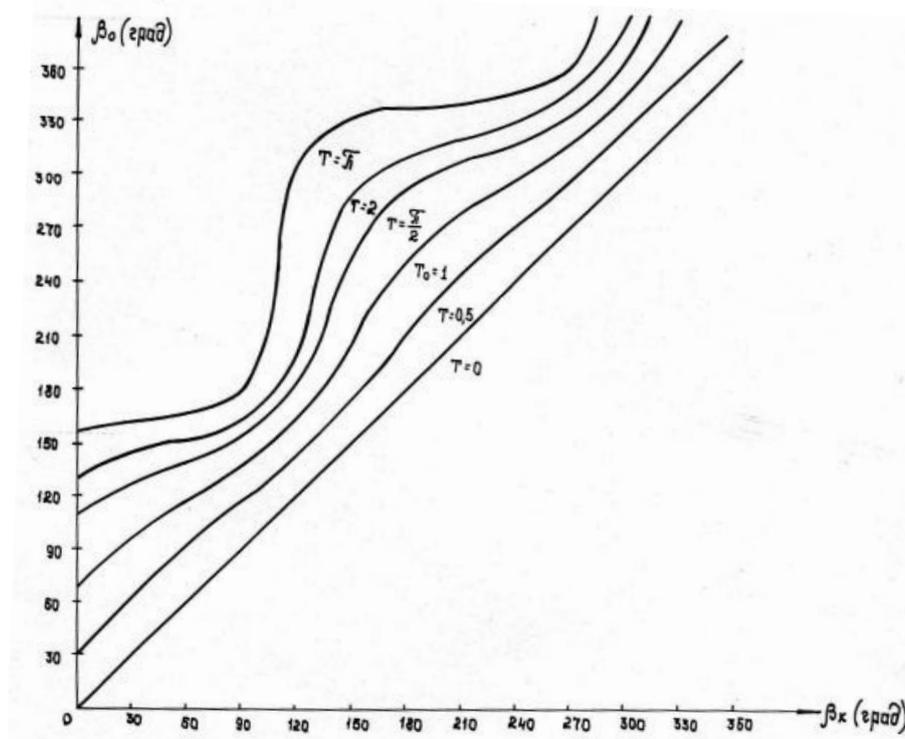


Рис. 1. Зависимости угла подхода ТК от его начального положения в орбитальной ОСК

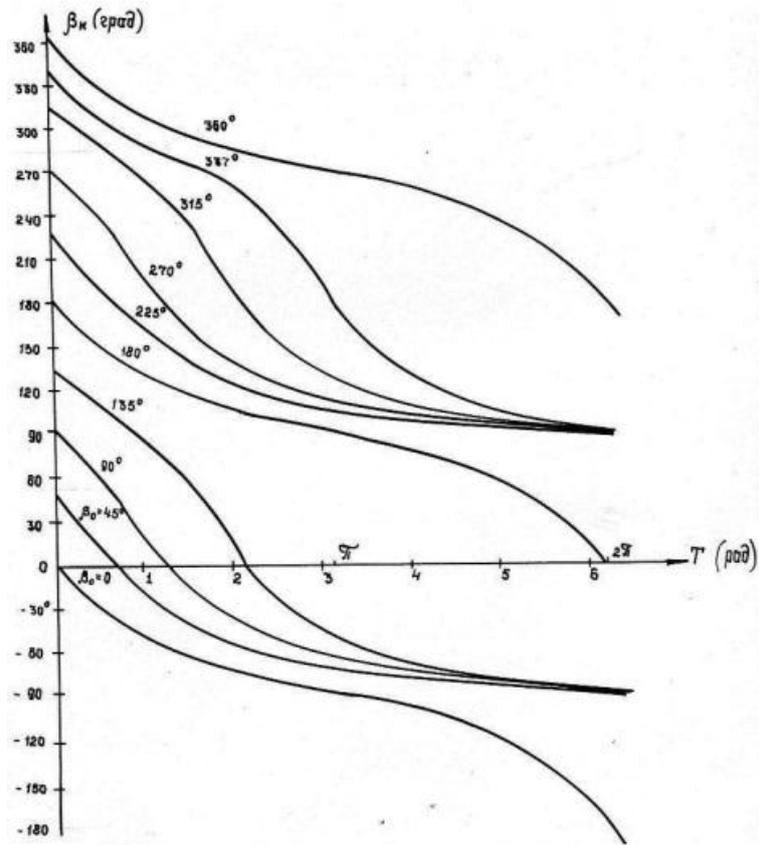


Рис. 2. Зависимости угла подхода ТК в орбитальной ОСК от времени выполнения маневра

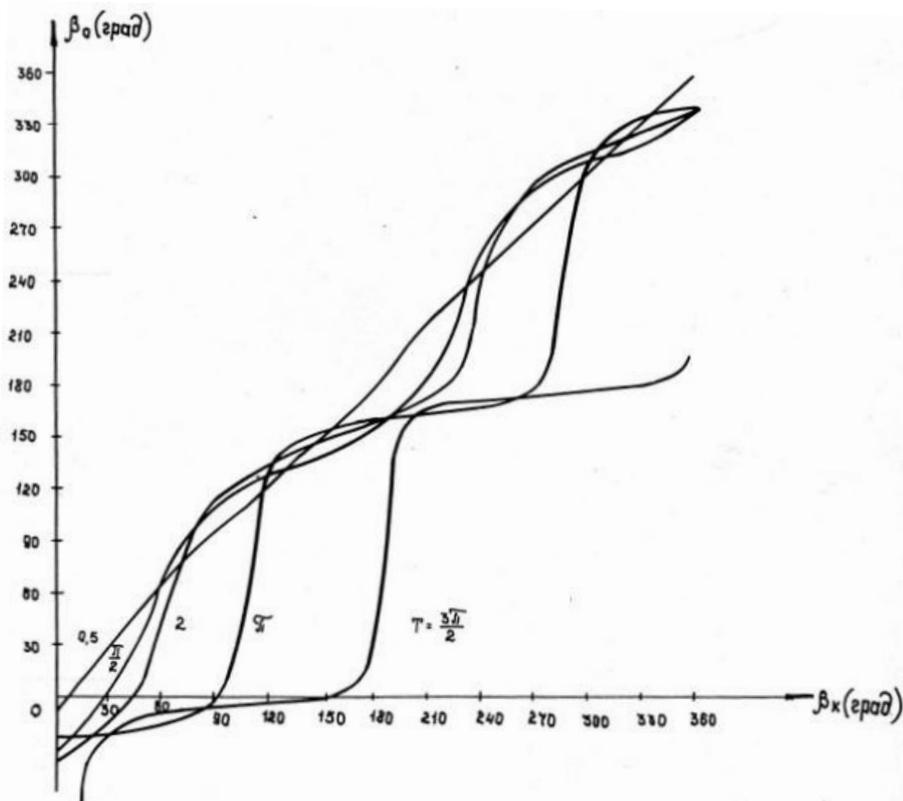


Рис. 3. Зависимости угла подхода ТК от его начального положения в невращающейся ОСК

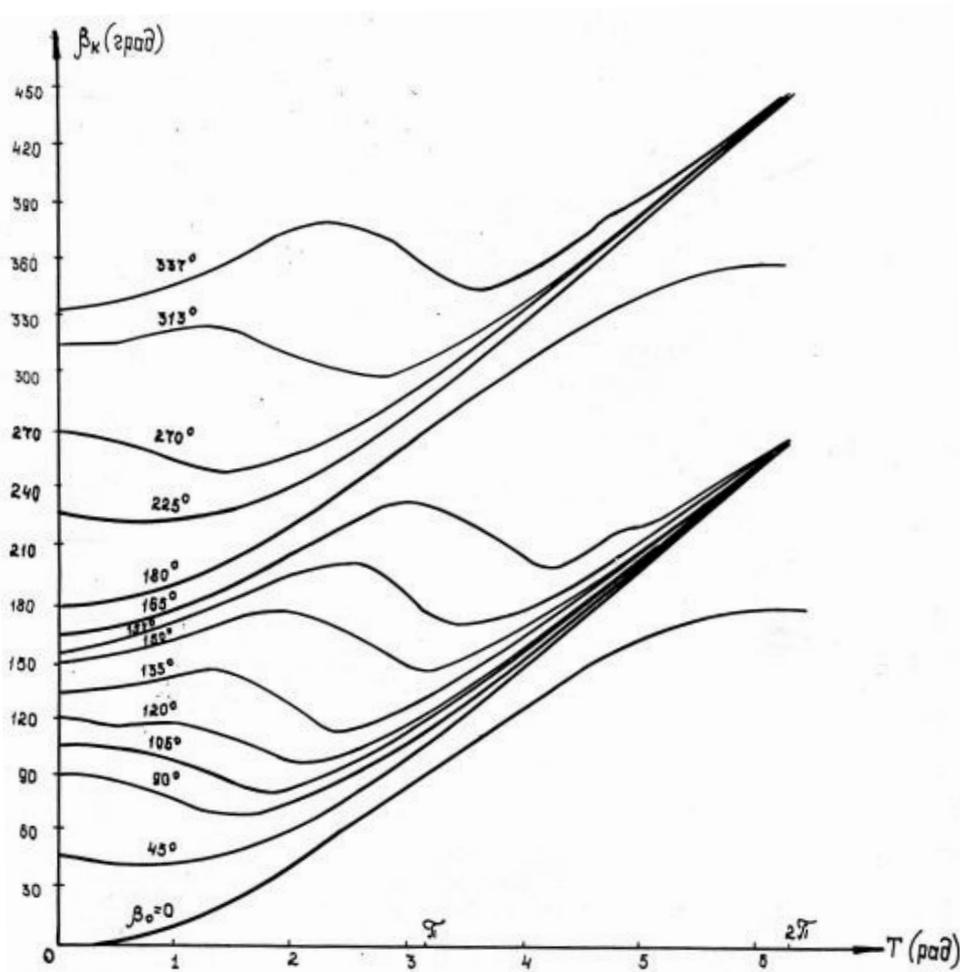


Рис. 4. Зависимости угла подхода ТК в невращающейся ОСК от времени выполнения маневра

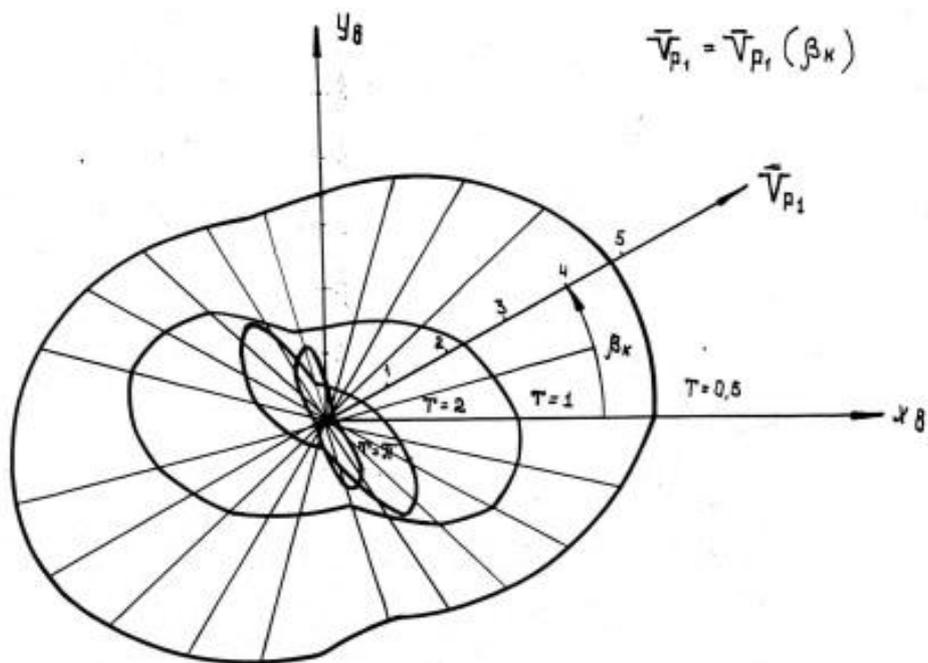


Рис. 5. Зависимость энергетических затрат от угла подхода ТК в орбитальной ОСК

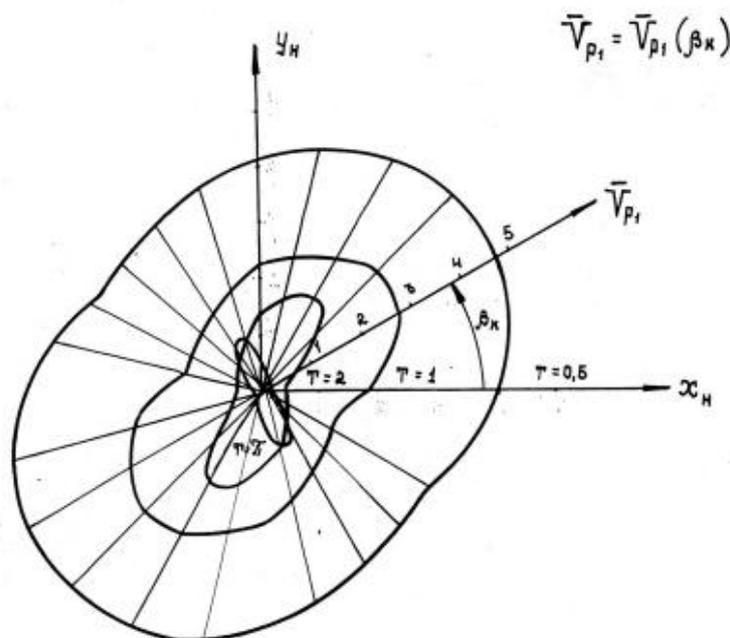


Рис. 6. Зависимость энергетических затрат от угла подхода ТК в невращающейся ОСК

Особенности построения системы управления. Что же касается особенностей построения системы управления взаимным маневром в целом, то помимо широко используемого в настоящее время варианта системы, связанного с самонаведением ТК на ОС, здесь может быть применен вариант наведения на себя. Последнее особенно привлекательно, если учесть, что количество стыковочных узлов на перспективных ОС будет возрастать. В этом варианте такие основные элементы системы управления, как навигационные измерители параметров ОД центров масс и формирователь управляющих сигналов (бортовой вычислительный комплекс) находятся на ОС и многократно используются для управления каждым последующим ТК.

Таким образом, все транспортные космические корабли, осуществляющие операцию стыковки с ОС, не будут содержать этой существенной части аппаратуры управления.

Результаты численного моделирования методов и алгоритмов управления ТК при реализации предложенных в работе способов осуществления стыковки с орбитальными станциями позволили определить зависимости угла подхода ТК к ОС от начальных условий маневра. Используя эти зависимости, представленные на рис. 1–4, можно заранее развернуть корпус ОС в требуемое угловое положение в выбранной ОСК при наличии встречной ориентации или обеспечить необходимые начальные условия маневра ТК при отсутствии таковой. Результаты этого же моделирования, иллюстрируемые рис. 5, 6, позволяют оценить энергетические затраты на выполнение маневра в зависимости от угла подхода и выбрать оптимальное с энергетической точки зрения его значение.

Результаты исследований могут быть использованы при планировании и разработке способов осуществления стыковки ТК с ОС, оборудованными несколькими стыковочными узлами.

Список используемых источников

1. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г., Ярошевский В.А. Маневрирование космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1970. – 416 с.
2. Балахонцев В.Г., Иванов В.А., Шабанов В.И. Сближение в космосе. – М.: Воениздат, 1973. – 240 с.

3. *Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А.* Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
4. *Бибенин Г.Г., Скребушевский Б.С., Соколов Г.А.* Системы управления полетом космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 272 с.
5. *Власов С.А., Мамон П.А.* Теория полета космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
6. *Гончаревский В.С.* Автоматизированное управление взаимным маневром космических аппаратов вдоль линии визирования. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 91 с.
7. *Гончаревский В.С.* Взаимный маневр космических аппаратов при отсутствии ограничений на вид траектории. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 115 с.
8. *Гончаревский В.С.* Методы и алгоритмы управления относительным маневром космических аппаратов. – МО РФ, 1998. – 87 с.
9. *Ермилов Ю.А., Иванова Е.Е., Пантюшин С.В.* Управление сближением космических аппаратов. – М.: Наука, 1977. – 448 с.
10. *Иванов Н.М., Лысенко Л.Н.* Баллистика и навигация космических аппаратов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 523 с.
11. *Кравец В.Г.* Автоматизированные системы управления космическими полетами. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
12. *Кубасов В.Н., Данков Г.Ю., Яблонько Ю.П.* Методы сближения на орбите. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
13. *Лебедев А.А., Соколов В.Б.* Встреча на орбите. – М.: Машиностроение, 1969. – 366 с.
14. *Пономарев В.М.* Теория управления движением космических аппаратов. – М.: Наука, 1965. – 456 с.
15. *Разыграев А.П.* Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. – М.: Машиностроение, 1977. – 472 с.
16. *Титов Г.С., Иванов В.А., Горьков В.Л.* Межорбитальные локальные маневры космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1982. – 245 с.

К.Е. Легков,
кандидат техн. наук;
В.В. Оркин

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Работа посвящена исследованию вопросов эффективности функционирования информационных систем и разработке модели функционирования информационной подсистемы автоматизированной системы управления. Рассматриваются проблемы распределения информационных потоков в информационной подсистеме автоматизированной системы управления специального назначения и вопросы обеспечения эффективного функционирования информационной подсистемы при воздействии компьютерных атак.

Ключевые слова: модель информационной системы, стохастическая матрица, вероятность своевременной доставки, предоставление информации, автоматизированная система управления.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения предоставления информации должностным лицам органов управления и комплексам средств автоматизации в автоматизированных системах управления создаются информационные подсистемы. Повышение масштаба и сложности решаемых задач органами управления в условиях часто сложной обстановки, в которой необходимо принимать решения, обуславливает необходимость обеспечения эффективного функционирования информационных систем. В то же время алгоритмы функционирования информационных подсистем практически всех автоматизированных систем управления унаследованы от телекоммуникационных сетей и не нацелены на своевременное предоставление информации требуемого качества должностным лицам [1, 2]. При возрастании объемов передачи информации и в условиях компьютерных атак могут возникать задержки в предоставлении должностным лицам информационных услуг. Таким образом, существует противоречие в практике между необходимостью повышения оперативности предоставления информации при планировании и проведении мероприятий органами управления и сокращением циклов проведения различных мероприятий (операций) при внешних воздействиях и ограничении на информационные ресурсы.

Вопросы обеспечения эффективности информационных систем, телекоммуникационных систем и систем связи широко освещены в научной литературе. Предлагаются методы и алгоритмы повышения оперативности и результативности их функционирования [3–5]. В работах [6–8] рассмотрены методы динамического распределения информации на коммутируемых сетях. Но в настоящее время вопрос, связанный с возможностью комплексного применения предложенных методов и алгоритмов при обеспечении эффективности функционирования информационных подсистем (ИПС) АСУ специального назначения, в том числе с определением условий их наиболее эффективного применения при деструктивных воздействиях, остается актуальным.

В данной работе решается задача моделирования функционирования информационной подсистемы автоматизированной системы управления при воздействиях на нее. Такая задача является актуальной и соответствует современным тенденциям развития информационных технологий.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цели управления ИПС исходят из требований пользователей, каковыми являются:

- обеспечение необходимого качества обслуживания абонентов ИПС;
- возможность обслуживания приоритетных абонентов;
- способность ИПС адаптироваться к изменению требований к качеству обслуживания;
- простота подключения к ИПС.

Выполнение целей обеспечит условия для эффективного функционирования ИПС в целом и отдельных ее компонентов в различных условиях, в том числе в условиях воздействия на нее и систему управления ИПС комплекса естественных и преднамеренных возмущений [1].

Показатель эффективности функционирования ИПС АСУ специального назначения целесообразно задать функционалом:

$$F(t, \mathbf{V}, \mathbf{Z}, S, \mathbf{U}_f), \quad (1)$$

где t – время функционирования ИПС;

\mathbf{V} – вектор фиксированных (невозмущенных) параметров и характеристик ИПС;

\mathbf{Z} – вектор внешних возмущений;

S – оцениваемое состояние ИПС;

\mathbf{U}_f – вектор управления функционированием ИПС.

Фиксированные параметры и характеристики ИПС заданы вектором:

$$\mathbf{V} = \langle A, Sv, Serv, J, K \rangle, \quad (2)$$

где A – множество запрашиваемых информационных услуг, $A = \{a_1, a_2, \dots\}$;

Sv – множество параметров, характеризующих размерность и связность структуры информационной подсистемы, $Sv = \{sv_1, sv_2, \dots\}$;

$Serv$ – множество параметров, характеризующих производительность серверов ИПС на узлах предоставления услуг, $Serv = \{serv_1, serv_2, \dots\}$;

J – пропускная способность виртуальных каналов в ИПС;

K – параметры, характеризующие надежность элементов ИПС.

Возмущающие параметры (внешние и внутренние воздействия) ИПС заданы вектором:

$$\mathbf{Z} = \langle \Lambda(A), Z_{КА}, Z_{П}, Z_{РВ} \rangle,$$

где Λ – множество потоков заявок на предоставление информационных услуг, поступающих в ИПС, $\Lambda(A) = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots\}$;

$Z_{КА}$ – множество воздействий компьютерных атак на программно-аппаратные средства ИПС;

$Z_{П}$ – множество воздействий естественных и преднамеренных помех;

$Z_{РВ}$ – множество разрушающих воздействий.

Рассматривая $F(t, \mathbf{V}, \mathbf{Z}, S, \mathbf{U}_f)$ как функцию от управления функционированием, можно утверждать, что выбор конкретной процедуры $\mathbf{U}_f = u^*$ обеспечит вполне конкретное значение показателя эффективности ИПС АСУ СН при определенном уровне внешних воздействий, где x – решение по выбору процедуры управления функционированием ИПС. Представим функционал F в виде $F(u^*, S, z, t)$. Он зависит от выбора процедуры управления функционированием u^* , от состояния $S(t)$ в момент ее выбора и от состояния среды $z \in Z$.

Комплексным показателем эффективности функционирования ИПС АСУ является вероятность своевременного обслуживания поступивших от пользователя заявок на предоставление необходимого количества информации (ИУ) требуемого качества и в установленные сроки. Задачей данной работы является поиск возможности обеспечения оперативности обслуживания заявок на предоставление информации при информационных воздействиях.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ

С учетом того, что основное предназначение ИПС АСУ состоит в предоставлении должностным лицам органов управления комплекса информационных услуг, целесообразно ее представить следующей формализованной схемой, отражающей данный аспект (рис. 1). На схеме показаны также воздействия на ИПС. Видно, что заявки разных классов распределяются по направлениям к узлам предоставления услуг. Выбор направления осуществляется по планам распределения, формирование которых происходит в соответствии с процедурами управления функционированием.

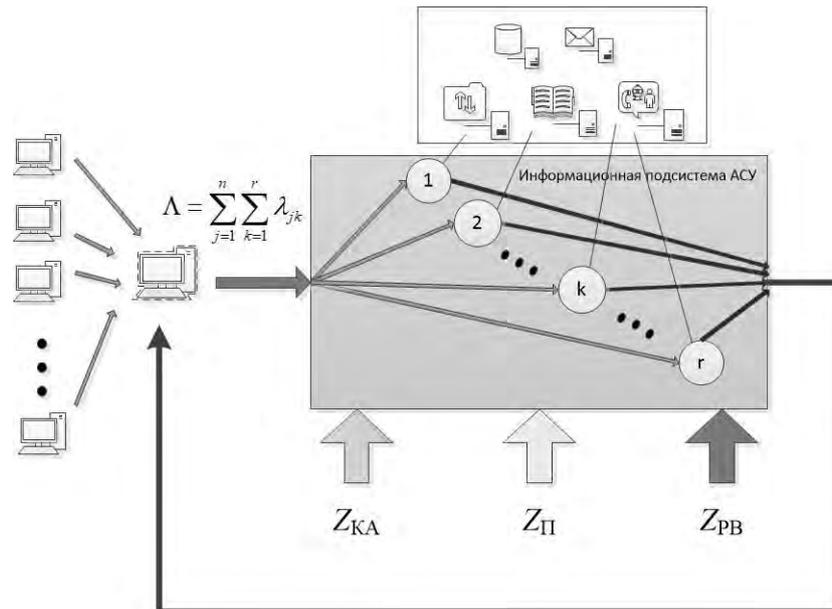


Рис. 1. Формализованная схема информационной подсистемы

Пусть в систему поступает n разновидностей заявок на предоставление услуг. Интенсивности поступления конкретных видов заявок $\lambda_j, j = \overline{1, n}$. Средние времена обслуживания заявок данных видов $t_j, j = \overline{1, n}$. Важны следующие два класса характеристик обслуживания заявок в системе:

- характеристики вида заявок (можно отнести заявки на предоставление информационных услуг к разным видам при различных временах их обслуживания);
- характеристики всего потока заявок, представляющего собой сумму потоков заявок разных видов.

Каждый вид заявок характеризуется схожим образом с однородным потоком заявок в системе массового обслуживания (СМО). Обычно для СМО выделяются следующие характеристики: нагрузка на узле, которая создается видом j заявок $y_j = \lambda_j / \mu_j = \lambda_j t_j, j = \overline{1, n}$; вероятность потери заявки j -го вида p_{uj} ; вероятность обслуживания заявки $p_{oj} = 1 - p_{uj}$; интенсивность потока обслуженных заявок (производительность по j -му виду заявок)

$$\lambda_{oj} = p_{oj} \lambda_j.$$

Накопитель может считаться накопителем с неограниченной очередью при $p_{uj} = 0$.

Заявки распределяются по направлениям k внутри информационной подсистемы, где $k = \overline{1, r}$. Таким образом, интенсивность суммарного потока заявок в информационной подси-

стеме представляет собой сумму заявок на предоставление информации по направлениям ко всем УУ, в свою очередь в одном направлении суммируются заявки по всем видам:

$$\Lambda = \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^n \lambda_{jk}, \quad (3)$$

Суммарная (общая) нагрузка информационной системы Y вычисляется по формуле:

$$Y = \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^n y_{jk}. \quad (4)$$

Загрузка k -го узла вычисляется по формуле:

$$\rho_k = \frac{\lambda_k T_k}{C_k}, \quad (5)$$

где ρ_k – нагрузка k -го узла;

C_k – количество серверов на узле предоставления услуг (УУ);

T_k – среднее время обслуживания заявки суммарного потока к k -му УУ.

Условием отсутствия перегрузок в ИПС с неоднородным потоком заявок и накопителем неограниченной емкости является отсутствие перегрузок для каждого УУ: $\rho_k < 1$ [9].

Немаловажной для потока заявок на предоставление информации характеристикой является функция распределения интервала времени между поступающими заявками и зависимость или независимость случайных интервалов времени между собой.

ИПС – это сеть массового обслуживания. Для сети массового обслуживания определяется количество узлов r , предоставляющих информационные услуги. На узлах-потребителях информационных услуг существует матрица Π вероятностей передачи заявок по конкретному направлению (к конкретному УУ).

Естественно, что интенсивность потока должна быть выше по тому направлению, где качество обслуживания определенного вида заявки выше (вероятность своевременного предоставления информации по заявке данного вида с требуемым качеством). Задача сводится к тому, чтобы по направлениям обслуживания с более высоким качеством заявки направлялись чаще, чтобы исключить простой и не допустить перегрузок.

Для того чтобы в ИПС отсутствовали перегрузки, необходимо, чтобы отсутствовали перегрузки во всех УУ. Данное условие выполняется при

$$\rho_k = \frac{\lambda_k T_k}{C_k} = \frac{\alpha_k \Lambda T_k}{C_k}, \quad \forall k = \overline{1, r},$$

где Λ – интенсивность потока поступающих заявок в ИПС;

α_k – средняя доля заявок поступающих в k -й УУ;

T_k – среднее время обслуживания заявки суммарного потока в k -м УУ;

C_k – количество серверов на k -м узле предоставления услуг.

Отсутствие перегрузок характеризует установившийся режим при стационарном входящем потоке. На основе известных данных о количестве узлов r , количестве обслуживающих серверов на j -м УУ C_k , вероятностей направления заявок к определенному УУ, интенсивности потока заявок, поступающих в ИПС, средних времен обслуживания заявок могут быть рассчитаны общие (сетевые) характеристики ИПС, описывающие ее эффективность. Интенсивности $\lambda_j, j = \overline{1, n}$ потоков заявок в УУ определяются вероятностями выбора направления передачи заявок (рис. 1). Для ИПС коэффициент передачи α_k будет равен вероятности направления заявки к k -му УУ. В ИПС отсутствуют перегрузки при выполнении условия (для суммарного потока всех видов заявок):

$$\Lambda < \min \left(\frac{C_1}{\alpha_1 T_1}, \frac{C_2}{\alpha_2 T_2}, \dots, \frac{C_r}{\alpha_r T_r} \right).$$

Если указанное условие не выполняется, то согласно [9] стационарный режим в ИПС может быть достигнут одним из следующих способов:

- уменьшением интенсивности входного потока заявок;
- увеличением количества серверов на УУ;
- сокращением времени обслуживания заявок;
- уменьшением доли заявок, направляемых к перегруженным УУ.

Планируется показать, что именно адаптивным управлением функционированием ИПС, которое в конечном счете (на техническом уровне) приводит к изменению матрицы вероятностей передачи по определенным направлениям обслуживания, возможно добиться снижения загрузки узлов предоставления услуг при ограничениях на ресурсы (сервера обработки поступающих заявок). Кроме того, результатом является снижение коэффициента простоя $K_{\Pi} = 1 - \rho_k$ на тех узлах, где время обслуживания заявки меньше. В результате повышается оперативность обслуживания заявок.

Общий поток заявок, поступающих в ИПС, близок к простейшему из-за того, что источников заявок в реальной ситуации больше, чем пять (в литературе по теории массового обслуживания указывается именно такое условие).

Простейший информационный поток заявок является ординарным, стационарным и без последствия [6]. У него вероятность того, что на фиксированном участке времени поступит ровно l заявок на предоставление информации, определяется следующим выражением:

$$P\{N(t, \tau) = l\} = \frac{(\lambda\tau)^l e^{-\lambda\tau}}{l!},$$

где λ – интенсивность потока;

τ – длина произвольного участка времени.

Естественно, модель простейшего потока не всегда адекватно отражает процесс поступления заявок в динамике функционирования ИПС, так как интенсивность может меняться, однако в практических случаях моделирования функционирования ИПС целесообразно разработать подходы, позволяющие свести различные модели потоков заявок, отражающих реальные потоки в ИПС, к базовой модели потока для каждого временного интервала.

АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИНФОРМАЦИОННУЮ ПОДСИСТЕМУ

Как было сказано выше, среда, в которой находится ИПС, представлена как $Z = \langle Z_{КА}, Z_{\Pi}, Z_{РВ} \rangle$, где Z – воздействия на ИПС (компьютерные атаки $Z_{КА}$, помехи Z_{Π} , разрушающие воздействия $Z_{РВ}$). Рассмотрим внешние воздействия на ИПС более подробно, особенно остановимся на компьютерных атаках.

Информационными ресурсами ИПС АСУ являются следующие ресурсы:

- сведения о пользователях информационной системы;
- информация управления;
- пользовательские данные;
- программное обеспечение технических средств и систем управления;
- сведения о расположении серверов ИПС, установленном оборудовании, их загруженности;
- сведения, позволяющие раскрыть структуру механизмов обеспечения безопасности, используемых в системе.

Наличие возможности воздействия на информационные ресурсы ИПС, способного нанести ущерб информационной безопасности, является угрозой безопасности ИПС. Реализация угрозы возможна при наличии уязвимости. Поэтому для обеспечения информационной безопасности ресурсов ИПС необходима система средств и способов защиты, которая включает

в себя средства анализа защищенности, выявляющие уязвимости, способная противодействовать компьютерным атакам.

На первое место в обеспечении безопасности информационной системы выходит применение безопасных протоколов маршрутизации. Цели злоумышленника в контексте распределенной системы маршрутизации могут быть довольно широкими и разнообразными: злоумышленник может нацеливаться не только на конфиденциальность, целостность и доступность информации, переносимой в информационных сообщениях, но также на способ, с помощью которого информация перенаправляется и обрабатывается в сети (например, на правила формирования таблиц маршрутизации). В частности, в контексте протоколов маршрутизации противник может атаковать управляющую информацию, чтобы заставить другие объекты ИПС действовать незапланированными способами. Изменение управляющей информации прямо повлияет на показатель эффективности информационной подсистемы. Например, инсайдер (злоумышленник, расположенный внутри чувствительной в плане безопасности сети) может стремиться к извлечению (или дублированию) конфиденциальной информации, например, путем нарушения политики безопасности в логически разделенных областях сети, определяя, например, новый адрес назначения информационных сообщений. Заявка на предоставление информационной услуги может и не дойти до узла предоставления услуг. Даже в, казалось бы, «безопасной» среде, когда злоумышленник не может легко проверить или изменить информацию, потому что она зашифрована и подписана, взломанный протокол маршрутизации может представлять угрозы: шаблоны обмена данными (куда и откуда направляются заявки на получение информационных услуг) могут привести к утечке конфиденциальной информации. Кроме того, выполнение криптографических операций может быть слишком дорогостоящим мероприятием в высокопроизводительных и критически важных информационных системах и сетях, поэтому важно, чтобы протокол маршрутизации гарантировал целостность фактически принятых маршрутов либо процедуры их формирования.

В качестве угроз безопасности ИПС рассматриваются потенциально или реально существующие воздействия, которые могут привести (приводят) к некоторому «ущербу». В общем виде ущербом для ИПС могут быть:

- ознакомление злоумышленника с информацией, к которой у него нет доступа;
- значительное или полное разрушение информационных ресурсов;
- изменение таблиц маршрутизации, нарушение процедур направления потоков заявок на предоставление информационных услуг;
- нарушение функционирования узлов предоставления услуг.

Угрозы безопасности ИПС реализуются нарушителями безопасности через выявленные уязвимости сети. Уязвимости сети могут быть в нее внесены на технологическом или эксплуатационном этапах ее жизненного цикла [10].

Основными угрозами являются угрозы нарушения конфиденциальности, целостности, доступности. Кроме этого стоит отметить угрозы получения информации об информационной сети (АРМ, серверах, коммутаторах, маршрутизаторах), угрозы получения нарушителем прав локального пользователя или прав администратора.

Атакой на информационную подсистему называется действие или последовательность связанных между собою действий нарушителя, которые приводят к реализации угрозы путем использования уязвимостей системы. Под уязвимостью принято понимать слабое место ИПС, на основе которого возможна успешная реализация угрозы.

Информационная атака в общем случае может состоять из трех этапов (рис. 2):

1. Сбор информации.
2. Этап реализации атаки.

3. Этап дальнейшего развития атаки. В случае пассивной атаки либо при достижении целей атака завершается.

При моделировании информационной атаки необходимо определять ее параметры и характеристики. Основными параметрами атаки являются время действия t_d , кратность и список уязвимостей, используемых атакой.

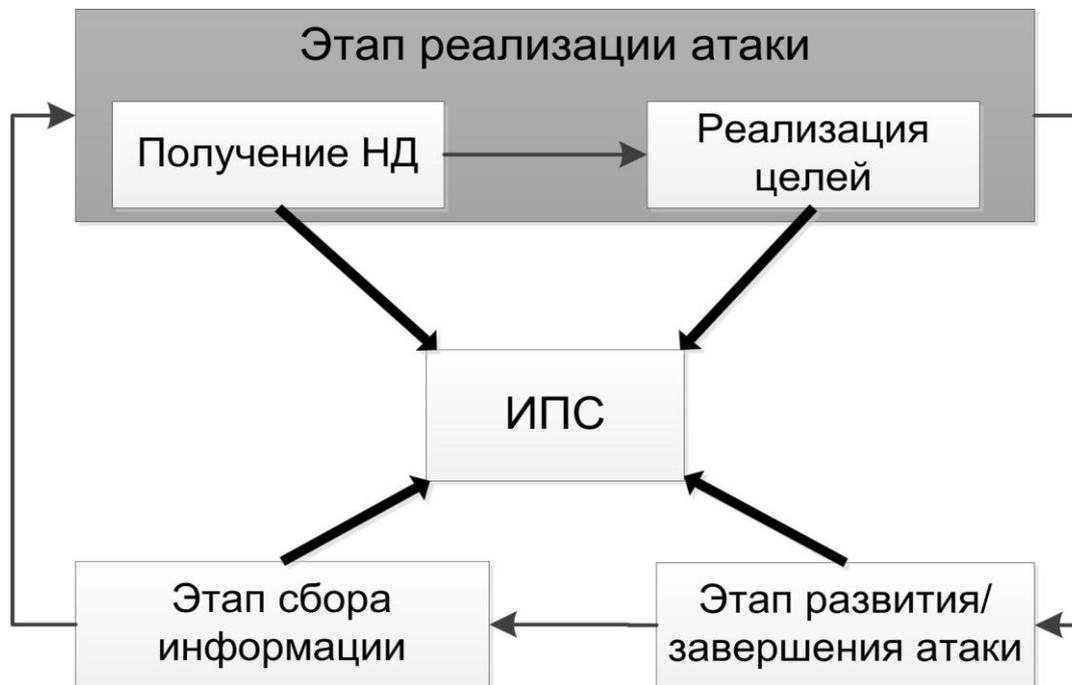


Рис. 2. Жизненный цикл компьютерной атаки

Рассмотрим атаку DDoS на ИПС АСУ, так как этот класс атак является наиболее критичным по своим последствиям для функциональности ИПС. Суть атаки состоит в том, что одновременно (либо с указанным интервалом времени) со всех скомпрометированных узлов (различных абонентов информационной подсистемы) к узлу предоставления услуг (объект атаки) отправляется большое количество ложных запросов и, как следствие, парализуется работа данного узла. Во время проведения атаки DDoS создается иерархичная структура объектов атаки – кластер DDoS. Старший объект координирует работу низших по иерархии объектов (агентов), которые, в свою очередь, и выполняют атаку. Модель атаки DDoS в виде графа представлена на рис. 3. Модель состоит из следующих узлов-этапов:

1. Происходит организация «команды» атаки: агенты посылают сообщение старшему объекту о своем состоянии готовности к атаке. В свою очередь, старший объект сохраняет информацию о состоянии готовности агентов.

2. Выполняется поиск уязвимостей объекта атаки, выбирается тип атаки, происходит передача установленных параметров атаки агентам.

3. Распределяется нагрузка между агентами и формируются команды для них, в которых указывают способ (Sp), интенсивность (λ_a), время (t_d) и другие параметры для проведения атаки.

4. Выполняется сама атака DDoS согласно данным, полученным от других агентов. В ходе выполнения атаки старший объект периодически получает сообщения от агентов и таким образом контролируют заданный режим выполнения атаки.

В результате атаки узел частично или полностью прекращает обслуживание, снижается показатель доступности, время ожидания $T_k^{\text{ож}}$ обслуживания заявок на k -м узле возрастает. Возрастает и время пребывания заявки в ИПС при направлении ее к k -му узлу $T_k^{\text{пр}} = T_k^{\text{ож}} + T_k$, соответственно снижается вероятность своевременного обслуживания поступивших от пользователя заявок на предоставление необходимого количества информации (ИУ) требуемого качества и в установленные сроки. В модели функционирования ИП необходимо учесть условие $T_k^{\text{пр}} < T_{\text{доп}}^{\text{пр}}$, где $T_{\text{доп}}^{\text{пр}}$ – предельное допустимое время пребывания заявок в системе. При невыполнении этого условия заявка направляется в другой узел, а матрица вероятностей передач изменяется, снижается вероятность передачи заявки по конкретному направлению (направление штрафуются).

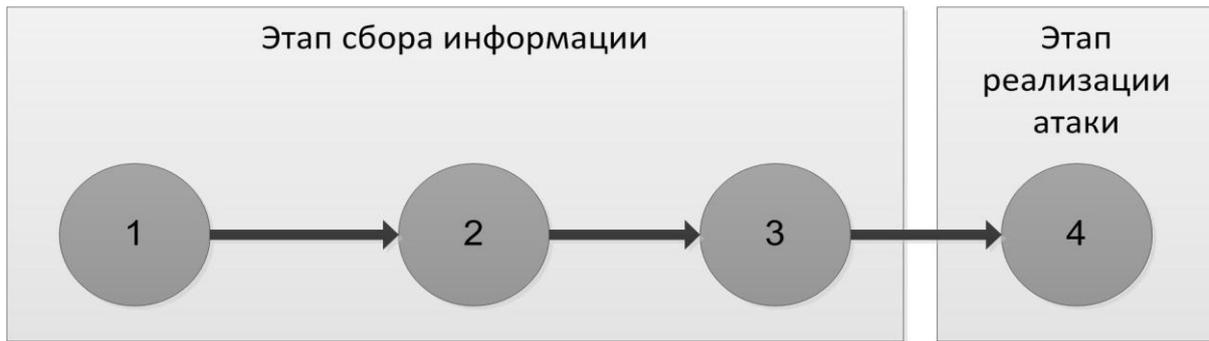


Рис. 3. Жизненный цикл DDoS атаки

Если применить ранее изложенный подход к сведению различных потоков требований к базовому и учесть потоки выхода из строя в результате компьютерных атак, то можно получить некоторые эквивалентные интенсивности переходов из состояния в состояние элементов ИПС, позволяющие задать динамику их функционирования в виде марковских процессов гибели и размножения следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t, j)}{dt} = -P_0(t, j)\lambda_{\text{эКВ}}(j) + \mu_{\text{эКВ}}(j)P_1(t, j); \\ \dots \\ \frac{dP_s(t, j)}{dt} = (s+1)\mu_{\text{эКВ}}(j)P_{s+1}(t, j) - [\lambda_{\text{эКВ}}(j) + s\mu_{\text{эКВ}}(j)]P_s(t, j) + \lambda_{\text{эКВ}}(j)P_{s-1}(t, j); \\ \dots \\ \frac{dP_n(t, j)}{dt} = -n\mu_{\text{эКВ}}(j)P_n(t, j) + \lambda_{\text{эКВ}}(j)P_{n-1}(t, j), \quad s = \overline{1, n}, j = \overline{1, N}; \end{cases} \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{эКВ}}(j)$ – эквивалентное значение интенсивности потоков, переводящих ИПС из состояния s в состояние $s+1$, $\lambda_{\text{эКВ}}(j) = \lambda(j) + \lambda_{\text{КА}}(j)$;

$\mu_{\text{эКВ}}$ – эквивалентное значение интенсивности приведенных потоков, переводящих ИПС из состояния s в состояние $s-1$, $\mu_{\text{эКВ}}(j) = \mu(j) + \mu_{\text{КА}}(j)$;

$P_s(t, j)$ – вероятность нахождения j -го узла предоставления услуг ИПС в момент времени t в s -м состоянии в условиях конечной надежности элементов компонентов и комплекса информационных воздействий нарушителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены элементы модели функционирования информационной подсистемы автоматизированной системы управления.

Выбор той или иной процедуры формирования плана управления потоками в информационной подсистеме автоматизированной системы управления планируется осуществлять в зависимости от состояния системы. ИПС представлена в виде разомкнутой сети массового обслуживания, в которой главным объектом воздействия со стороны системы управления является матрица вероятностей направления обслуживания заявки на предоставление информации к конкретному узлу обслуживания. Отличие данной модели от предыдущих состоит в представлении плана распределения заявок на предоставление информационных услуг в виде стохастической матрицы с возможностью его постоянной корректировки по данным о времени обслуживания заявок на конкретных узлах.

Создание конкретной методики планируется в дальнейших исследованиях и основывается на использовании модели обеспечения эффективности функционирования информационной подсистемы автоматизированной системы управления. В результате функционирование информационной подсистемы планируется осуществлять на основе алгоритмов адаптивного управления потоками заявок по известным методам управления. Применение конкретного алгоритма организуется в зависимости от конкретного состояния информационной подсистемы автоматизированной системы управления.

Список используемых источников

1. Буренин А.Н., Курносов В.И. Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями / под ред. д-ра техн. наук, проф. В.И. Курносова. – М.: Наука, 2011. – 464 с.
2. Буренин А.Н., Легков К.Е. Инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления. – М.: Медиа Паблишер, 2015. – 348 с.
3. Легков К.Е. Методы управления параметрами, характеризующими процессы функционирования инфокоммуникационной системы специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 3. – С. 49–55.
4. Легков К.Е., Буренин А.Н. К вопросу управления эффективностью инфокоммуникационных систем специального назначения // N&ES: Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2014. – Т. 6, № 1. – С. 38–43.
5. Аванесов М.Ю., Присяжнюк С.П. Оперативное управление потоками данных в мультисервисных сетях связи. – СПб.: БГТУ, 2007. – 81 с.
6. Лазарев В.Г., Саввин Н.Г. Сети связи, управление, коммутация. – М.: Связь, 1973. – 264 с.
7. Новиков С.Н. Классификация методов маршрутизации в мультисервисных сетях связи // Вестник СибГУТИ. – 2013. – № 1. – С. 57–67.
8. Исъянов В.М., Лазарев В.Г., Паршенков Н.Я. Децентрализованный способ динамического распределения информации на автоматически коммутируемых сетях связи // Автоматы и управление сетями связи. – М.: Наука, 1971. – С. 68–71.
9. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
10. Емельянов А.В., Легков К.Е., Оркин В.В. Анализ проблем информационной безопасности информационных систем специального назначения при управлении ими // Труды II Межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». – 2017. – Т. 2. – С. 122–126.

Д.А. Мосин,
кандидат техн. наук, доцент;
Д.В. Садыков;
А.Н. Скрипников,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

В статье приведена методика баллистического обоснования детерминированной орбитальной группировки малых космических аппаратов непрерывного обслуживания приполярных районов Земли, построенной по принципу «система-цепочка» на приполярных околокруговых орбитах, позволяющая рассчитывать баллистические структуры орбитальных группировок непрерывного обслуживания арктического широтного пояса для решения различных задач.

Ключевые слова: малый космический аппарат, система-цепочка, баллистическая структура, непрерывное обслуживание, Арктический регион.

ВВЕДЕНИЕ

Космическая деятельность является важнейшим фактором обеспечения безопасности и социально-экономического развития нашего Отечества. Необходимость дальнейшего повышения обороноспособности и безопасности Российской Федерации требует увеличения эффективности использования космоса в военных целях, поэтому на современном этапе развития космических программ приоритетным направлением стало форсированное создание перспективных космических систем и комплексов, что является актуальным и для политического, военного и социально-экономического развития страны.

Развитие науки и техники привело к возможности миниатюризации практически всех бортовых систем космических аппаратов (КА) без ущерба для их функциональных качеств, что позволило конструировать и использовать малые космические аппараты (МКА).

Применение космических систем и комплексов существенно повышает эффективность человеческой деятельности в различных отраслях хозяйства, науки и техники, в том числе и действий вооруженных сил, поэтому все государства стремятся развивать космические технологии. На современном этапе США располагают самой мощной и совершенной группировкой спутников. В течение последних лет это государство определило свои цели в космосе во многих документах. В их числе «План Космического командования США на период до 2020 года», «Космическая доктрина» президента Обамы, «Стратегия национальной безопасности в космическом пространстве», «Новая военно-космическая стратегия США». В 2010 году Объединенный комитет начальников штабов вооруженных сил США принял концепцию Joint Vision-2010 (концепция «Полного спектра доминирования») и в качестве главной задачи космической деятельности указал в ней достижение и укрепление безусловного американского военного превосходства и лидирующей роли в космическом пространстве. В достижении этой цели далеко не последнюю роль будут играть малые космические аппараты [1].

ПРЕИМУЩЕСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Малые КА обладают многими преимуществами перед большими спутниками. Так, они относительно недороги, легко модифицируются для решения различных задач, создают меньше радиопомех. Их применение способствует уменьшению рисков, связанных с запус-

ком на орбиту и работой в космосе, снижая финансовые потери в случае отказа или утраты такого спутника. К снижению массы отдельного МКА ведет и построение систем из спутников, работающих на невысоких орбитах, в составе которых могут быть десятки, а в перспективе – сотни (и даже тысячи) аппаратов. В целом такие системы часто оказываются более эффективными технически и экономически по сравнению с теми, где применяются большие и тяжелые спутники. Действительно, низкоорбитальные системы имеют в своем составе много спутников, поэтому выход из строя одного или нескольких МКА не приводит к потере работоспособности системы.

Преимуществами использования космических систем и комплексов на основе МКА являются [2]:

- малые сроки разработки, позволяющие своевременно внедрять новые технологии космического приборостроения;
- быстрое восполнение группировки в случае выхода из строя отдельных МКА;
- значительное увеличение оперативности получения данных наблюдения за счет создания необходимой по численности группировки МКА;
- экономическая эффективность целевого использования МКА на высотах функционирования до 1000 км, на которых срок активного существования «тяжелых» КА без применения соответствующих средств коррекции орбиты достаточно мал.

Группа МКА, объединенная в орбитальную систему или орбитальную группировку (ОГ), позволяет оперативно получать данные для решения широкого круга социально-экономических задач, в том числе: картографии, мониторинга и контроля окружающей среды, метеорологии, прогнозирования опасных явлений и оперативного контроля чрезвычайных ситуаций, инфотелекоммуникационного обеспечения деятельности различных министерств и ведомств и др. Особенно актуально для России решение вышеперечисленных проблем в Арктическом регионе, освоение которого с течением времени будет играть все большую роль для различных аспектов развития нашей страны.

Возможны следующие варианты создания ОГ МКА [2]:

1. Кластер МКА (желательно не более 10 спутников), каждый из которых выполняет свою функцию в рамках единой целевой программы, текущее планирование работы и обработка информации в этом случае осуществляются специально разработанными для каждого КА программными средствами;
2. Большое количество однотипных взаимозаменяемых МКА, работа с которыми выполняется по единой технологии.

Исходя из полученных теоретических и практических результатов в области построения спутниковых систем можно выделить следующие типы кластеров МКА [3]:

- 1) распределенный космический аппарат – система МКА на орбите, в которой целевая функция равномерно распределена между множеством однотипных космических аппаратов;
- 2) фрагментированный космический аппарат – система МКА на орбите, в которой каждый космический аппарат имеет свое узкое функциональное назначение.

В развитых странах Запада [4] современные МКА создаются быстро (обычно за 12–18 месяцев) при сравнительно небольших затратах. В ходе их создания максимально используются современные «коробочные» технологии. Спутники проектируются в соответствии с заданными параметрами по затратам – для выполнения задач в течение заданного времени полезного использования (и не более того). Кратко это можно охарактеризовать следующей схемой (рис. 1).



Рис. 1. Структура общих расходов на проведение космической миссии

Для эффективного решения задачи создания ОГ МКА необходимо создать научно-методический аппарат баллистического обоснования орбитальных группировок на основе малых КА, функционирующих на низких орбитах (преимущественно до 1000 км.), и обеспечивающих непрерывное обслуживание арктических районов Земли (рис. 2).

Под непрерывным обзором широтного пояса Земли [4] (в статье будет рассматриваться непрерывный обзор приполярных районов Земли), понимается такой вид наблюдения, когда любая точка заданного широтного пояса Земли в любой момент времени попадает в зону обзора хотя бы одного из КА орбитальной группировки (ОГ). В общем случае для построения ОГ КА непрерывного обзора используют принцип «система-цепочка», когда КА группируются в m плоскостях по n штук в каждой (рис. 3).

Создание и поддержание функционально устойчивых на длительных интервалах времени ОГ КА является сложной технической задачей, включающей в себя комплекс связанных в той или иной мере мероприятий: выбор устойчивой орбитальной структуры, управление орбитами системы в процессе функционирования, выбор закона восстановления системы и т. п.



Рис. 3. «Система-цепочка»

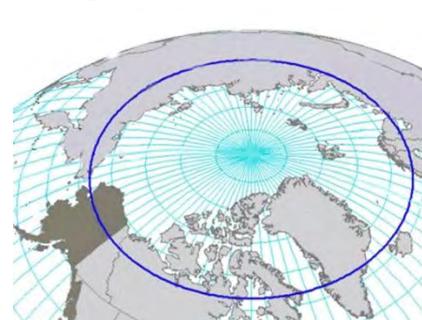


Рис. 2. Приполярные районы Земли

Особенно важным процессом является баллистическое обоснование орбитальной структуры [5]. Учитывая это, процесс баллистического проектирования любой системы КА в общем случае будет содержать несколько этапов, основными из которых являются [6]:

1. Изучение основных задач, стоящих перед ОГ КА.
2. Приближенный выбор класса орбит, позволяющих решать поставленные задачи.
3. Приближенный выбор орбитальной структуры ОГ КА.
4. Уточненный синтез орбитальной структуры ОГ КА.
5. Выбор законов управления орбитами ОГ КА.

Показатели результативности функционирования таких ОГ КА зависят от широты [7], на которой находится потребитель, следовательно, для расчета конкретных значений показателей необходимо знать геоцентрическую широту потребителя, причем на нижней широтной границе обслуживаемого района показатели результативности обслуживания в случае использования приполярных орбит будут минимальными (рис. 4).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ

В общем случае необходимо решить задачу баллистического проектирования ОГ КА, которая может осуществлять непрерывное обслуживание района Земли, ограниченного верхней и нижней геоцентрическими широтами (Ψ_n , Ψ_b) при минимальном количестве КА в системе. Для решения этой задачи требуется определить минимально необходимое количество КА, их размещение в пространстве, и наклонение орбит КА системы, исходя из условия обеспечения обслуживания указанного района с заданным уровнем результативности функционирования. При данном варианте построения ОГ КА полосы непрерывного обзора будут укладываться встык на нижней широте (нижней широтной границе обслуживаемого района).

Дано: i – наклонение орбит КА = 90° ; R_3 – радиус сферической Земли, $R_3 = 6371$ км; ψ_{\min} – минимальная (по модулю) широта обслуживаемого диапазона; ψ_{\max} – максимальная (по модулю) широта обслуживаемого диапазона; φ_3 – геоцентрический угол зоны обзора, который рассчитывается по формуле

$$\varphi_3 = \arcsin\left(\frac{R_3 + H_{\text{кр}}}{R_3} \sin \gamma\right) - \gamma,$$

если заданы высота круговых орбит системы КА ($H_{\text{кр}}$) и угол обзора бортовой аппаратуры КА (γ), или по формуле

$$\varphi_3 = \arccos\left(\frac{R_3}{R_3 + H_{\text{кр}}} \cos \delta\right) - \delta,$$

если задан δ – минимальным углом возвышения КА над линией местного горизонта (ЛМГ) в точке наблюдения (рис. 4).

Найти: $N_{\text{opt}}(m_{\text{opt}}) = \min_m N(m)$, – оптимальное количество КА в системе.

Здесь $N_{\text{opt}}(m_{\text{opt}}) = n_{\text{opt}} \cdot m_{\text{opt}}$ (m_{opt} – оптимальное количество плоскостей орбит КА системы, n_{opt} – оптимальное количество КА в каждой плоскости системы).

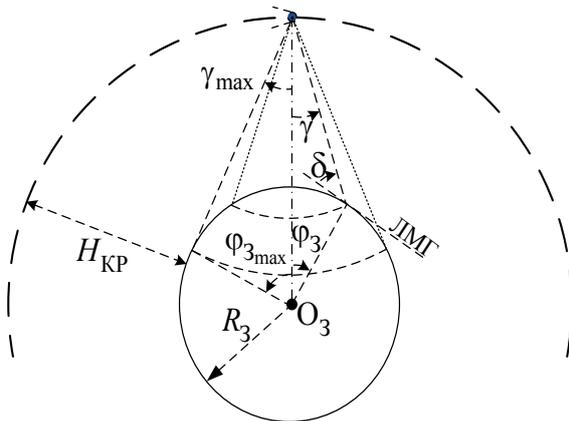


Рис. 4. К определению геометрического (геоцентрического) угла зоны обзора

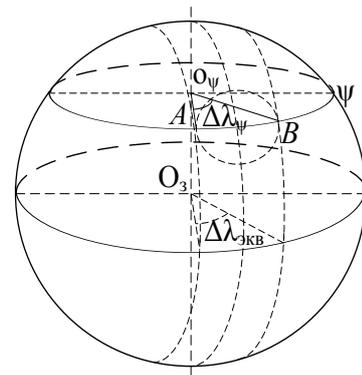


Рис. 5. Изменение ширины полосы обслуживания по долготе с увеличением геоцентрической широты

При проектировании ОГ КА обязательно необходимо учитывать то, что задача синтеза баллистической структуры носит целочисленный характер, и изменение требований по уровню результативности функционирования, обслуживаемому району, характеристикам типового КА как в меньшую, так и большую сторону может повлечь за собой существенное изменение баллистической структуры ОГ КА.

Необходимо отметить, что с увеличением геоцентрической широты ψ ширина полосы обслуживания по долготе – $\Delta\lambda_\psi$ увеличивается: $\Delta\lambda_\psi \geq \Delta\lambda_{\text{экв}}$ (рис. 5).

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ

Задача поиска оптимальной баллистической структуры системы КА непрерывного обзора широтного диапазона Земли является более общей задачей построения системы КА глобального непрерывного обзора с использованием полос непрерывного обзора (систем КА «Цепочка») [5].

Отличительными особенностями решения данной задачи будет являться то, что полосы непрерывного обзора должны быть расположены встык не на экваторе, а на нижней границе заданного широтного диапазона, а найденное количество КА в оптимальной баллистической структуре требуемой системы должно быть не больше, чем для системы глобального непрерывного обзора.

С учетом описанного выше, общая методика решения задачи заключается в последовательности действий описанных ниже.

1. Поиск диапазона возможных значений количества плоскостей орбит в системе КА. Известно понятие ширины полосы непрерывного обзора (b), которое определяется как (центральный) угол в плоскости перпендикулярной плоскости орбиты между направлениями на точки пересечения этой плоскости с границами полосы обзора [5].

Используем понятие проекции ширины полосы непрерывного обзора на параллель заданной широты Ψ и обозначим его – $\Delta\lambda_{\Psi}$. Проекцией ширины полосы обзора на параллель является угол в плоскости параллели между направлениями на точки пересечения плоскости параллели с границами полосы обзора и с началом в точке пересечения оси вращения Земли и плоскости параллели

$$\Delta\lambda_{\Psi \max} = \arcsin \frac{\sin \varphi_3}{\cos \Psi_{\min}}. \quad (1)$$

Минимально возможное количество (m_{\min}) плоскостей орбит системы КА соответствует варианту когда зоны обзора КА соседних плоскостей касаются друг друга с учетом (1):

$$m_{\min} = \left\lfloor \frac{\pi}{2\Delta\lambda_{\Psi \max}} \right\rfloor + 1. \quad (2)$$

Из определения полосы непрерывного обзора следует то, что крайним случаем возможного минимального количества КА в каждой плоскости орбит системы зоны обзора следующих друг за другом КА должны касаться друг друга. Для чего необходимо n_{\min} количество КА в каждой плоскости, которое возможно рассчитать по формуле:

$$n_{\min} = \left\lfloor \frac{\pi}{\varphi_3} \right\rfloor + 1. \quad (3)$$

Знание минимального количества плоскостей (2) и минимального количества КА (3) в каждой плоскости позволяют выполнить расчет баллистических структур системы путем перебора значений m до тех пор, пока число КА в каждой плоскости не станет минимальным.

2. Вычисление количества КА в системе путем перебора количества плоскостей орбит. Имея количество плоскостей орбит m и следовательно и количество полос непрерывного обзора, расположенных встык на заданной широте Ψ_{\min} , можно рассчитать значение проекции ширины полосы обзора на параллель заданной широты для определенного количества плоскостей орбит $\Delta\lambda_{\Psi}^{(m)}$ по следующей формуле:

$$\Delta\lambda_{\Psi}^{(m)} = \frac{\pi}{2m}. \quad (4)$$

Зависимость между шириной полосы обзора для заданного количества плоскостей орбит системы $b^{(m)}$ и ее проекцией на параллель заданной широты $\Delta\lambda_{\Psi}^{(m)}$, вычисляемой по формуле (4), для полярных орбит можно представить аналитически в следующем виде:

$$b^{(m)} = \arcsin(\sin \Delta\lambda_{\Psi}^{(m)} \cos \Psi). \quad (5)$$

С учетом вычислений по формуле (5) угловое расстояние между соседними КА в каждой плоскости будет рассчитываться по формуле

$$a^{(m)} = \arccos\left(\frac{\cos \varphi_3}{\cos b^{(m)}}\right), \quad (6)$$

Выполнив вычисление по формуле (6) можно рассчитать количество КА в каждой плоскости по формуле:

$$n^{(m)} = \begin{cases} \frac{\pi}{a^{(m)}}, & \text{если } \frac{\pi}{a^{(m)}} - \text{целое,} \\ \left[\frac{\pi}{a^{(m)}} \right] + 1, & \text{если } \frac{\pi}{a^{(m)}} - \text{дробное.} \end{cases} \quad (7)$$

При известных значениях количества плоскостей орбиты системы и количества КА в каждой плоскости получается возможным определить и общее количество КА в системе с помощью перемножения:

$$N^{(m)} = m \cdot n^{(m)}. \quad (8)$$

3. Определение оптимального количества КА системе. Сравнение всех возможных вариантов значений количества КА в системе вычисленных по формулам (4)–(8) и выбор минимального

$$N_{\text{opt}}(m_{\text{opt}}) = \min_m N(m)$$

позволит определить оптимальное сочетание m_{opt} и n_{opt} .

ВАРИАНТЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ ЗЕМЛИ ($\Psi_{\text{max}} = 90^\circ$)

Результаты расчетов оптимальных вариантов баллистической структуры ОГ КА (при условии минимума КА) инфотелекоммуникационного обеспечения для обслуживания приполярных районов Земли ($\Psi_{\text{max}} = 90^\circ$) при изменении нижней широтной границы обслуживаемого района для различных существующих и перспективных систем КА отечественного и иностранного происхождения представлен в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов оптимальных вариантов баллистической структуры ОГ КА

№ п/п	(Ψ_{min})	N_{opt}	n_{opt}	m_{opt}
При $H = 250$ км и $i = 90^\circ$				
1	60	68	17	4
2	65	57	19	3
3	70	45	15	3
4	75	34	17	2
5	80	26	26	1
При $H = 780$ км и $i = 90^\circ$ (ОГ КА типа Иридиум)				
1	60	24	12	2
2	65	20	10	2
3	70	16	8	2
4	75	11	11	1

Окончание табл. 1

№ п/п	(Ψ_{\min})	N_{opt}	n_{opt}	m_{opt}
При $H = 1000$ км и $i = 90^\circ$ (ОГ КА типа «Курс»)				
1	60	18	9	2
2	65	16	8	2
3	70	14	7	2
При $H = 1414$ км и $i = 90^\circ$ (ОГ КА типа «Орбкомм»)				
1	60	14	7	2
2	65	12	6	2
3	70	9	9	1
При $H = 1450$ км и $i = 90^\circ$ (ОГ КА типа «Гонец»)				
1	60	14	7	2
2	65	12	6	2
3	70	8	8	1

Анализируя результаты баллистического проектирования ОГ КА непрерывного обзора широтного пояса Земли видим, что баллистические структуры будут содержать не более двух плоскостей непрерывного обслуживания приполярных районов Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя особенности баллистических структур современных ОГ КА непрерывного обслуживания приполярных районов Земли, которые будут содержать не более двух плоскостей, можно сделать вывод, что при их развертывании в случае группового запуска КА достаточно двух РН [10]. При дальнейшем анализе таких структур необходимо рассматривать возможности группового запуска уже на этапе проектирования [11, 12]. Значимыми и важными могут стать одноплоскостные ОГ КА такого типа. В случае перспективных сверхмалых КА с уменьшением высоты орбиты, как видим, количество плоскостей растет, пропорционально вырастает и количество РН.

Список используемых источников

1. *Фатеев Ф.В.* Малые космические аппараты для больших оборонных задач [Электронный ресурс] // «Арсенал Отечества». – 2015. – № 4 (18). – URL: <http://www.vko.ru/oruzhie/bolshie-vozmozhnosti-pri-malyh-razmerah> (дата обращения: 18.10.2017).
2. О технологии комплексного применения группировки малых космических аппаратов / Л.А. Гришанцева, В.И. Бубненко, Н.А. Егорова, А.А. Емельянов, В.А. Селин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т 13, № 6. – С. 43–50.
3. *Клюшников В.Ю.* Построение кластеров малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 423–428.
4. Разработка систем космических аппаратов / под ред. П. Фортескью, Дж. Старка, Г. Суинерда. – М.: Альпина паблишер, 2015. – С. 653–659.
5. Обоснование параметров орбит космических аппаратов для повышения числа пролётов над районом поверхности Земли / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, В.В. Киселев, В.В. Салов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – № 655. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – С. 18–27.

6. Мосин Д.А., Баландин В.Н., Кириченко Д.В. Анализ возможности применения вероятностной системы космических аппаратов мониторинга земной поверхности // Труды Всероссийской НПК «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации». – Т. 2. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – С. 38–43.
7. Черный И.В. Бинобль в небе: от спутника для комбата к спутнику для солдата [Электронный ресурс] // Сайт «Новости космонавтики». – URL: <http://in-space.info/news/binokl-v-nebe-ot-sputnika-dlya-kombata-k-sputniku-dlya-soldata> (дата обращения: 12.09.2017).
8. Буренок В.М., Погребняк Р.Н., Скотников А.П. Методология обоснования перспектив развития средств вооруженной борьбы общего назначения / редкол.: В.В. Панов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 318–323.
9. Баушев С.В., Раскин А.В., Волгин В.А. Основы организации и ведения борьбы со средствами воздушно-космического нападения: учеб. пособие. – СПб.: Балтийская печать, 2017. – 176 с.
10. Остапенко О.Н., Баушев С.В., Морозов И.В. Информационно-космическое обеспечение группировок войск (сил) ВС РФ: учеб.-научное издание. – СПб.: Любавич, 2012. – 368 с.
11. Абдурахимов А.А., Левандович А.В., Баландин В.Н. Направления совершенствования научно-методического аппарата обоснования тактико-технических требований к группировкам малых космических аппаратов // Информация и космос. – 2016. – № 3. – С. 153–160.
12. Метод целенаправленной замены оптимизируемого функционала в задачах оптимального управления / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, А.В. Кульвиц, Е.П. Силла // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 3 (52). – С. 95–114.

А.Н. Григорьев,
доктор техн. наук;
Г.Г. Дмитриков;
Т.В. Попович,
кандидат техн. наук
АО «СПИИРАН – НТБВТ»;
А.А. Пятицкий;
О.В. Смирнова,
кандидат техн. наук
АО «СПИИРАН – НТБВТ»

ПРИНЦИПЫ И ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИНФРАСТРУКТУР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Предложена общая классификация объектов дистанционного зондирования, реализуемого с применением воздушных носителей оптико-электронных бортовых специальных комплексов. Рассматриваются основные принципы использования аэросъемочных систем, основанных на кадровых цифровых оптико-электронных камерах, и приводятся зависимости показателей производительности от типовых значений параметров функционирования воздушного носителя и бортового специального комплекса. Приводятся частные результаты планирования аэросъемки с учетом условий полета воздушного носителя и параметров используемого бортового специального комплекса. Представлены результаты прикладного эксперимента по формированию базовых пространственных данных о протяженном объекте на основе результатов фотограмметрической обработки кадровых аэроснимков.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, оптико-электронная съемка, информационное обеспечение, пространственные данные, объект и режим съемки.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы создания и использования инфраструктур пространственных данных в рамках информационного обеспечения основываются, в частности, на разработке и актуализации базовых пространственных данных. В зависимости от решаемой задачи в качестве указанных данных используются результаты применения оптико-электронных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), представляемые продуктами обработки изображений подстилающей поверхности. Высокими показателями детальности пространственных данных и временных параметров их получения характеризуются технологии дистанционного зондирования, основанные на использовании воздушных средств с оптико-электронными бортовыми специальными комплексами (БСК).

Базовые пространственные данные о заданном объекте, формируемые по результатам аэросъемки, могут быть представлены фотопланами и ортофотопланами соответствующей местности. В общем случае, фотоплан представляет собой непрерывное изображение земной поверхности, полученное в результате независимой пространственной привязки и трансформации отдельных снимков с последующим формированием на их основе общего геокодированного изображения. Указанные геометрические преобразования изображений выполняются на основе данных о положении и ориентации БСК при регистрации соответствующих кадровых снимков. При разработке фотопланов могут использоваться существующая цифровая модель местности. В свою очередь, ортофотоплан формируется в результате ортотрансформирования снимков, основанном на методах аналитической фотограмметрии. При этом обязательным условием является использование существующей или генерируемой в процессе обработки цифровой модели рельефа. При использовании базовых пространственных дан-

ных в качестве высокоточной координатной основы целесообразна разработка ортофотоплана в силу того, что при выполняемой совместной обработке снимков компенсируются ошибки данных о положении и ориентации БСК.

Теоретические и прикладные аспекты организации и ведения аэрофотосъемки в интересах разработки базовых пространственных данных широко исследованы в существующих работах, на основе которых сформированы соответствующие нормативные и справочные документы [1, 2]. При этом требуется актуализация и доработка известных исследований, обусловленные переходом от аналоговой фотографической съемки к цифровой оптико-электронной регистрации изображений и широким внедрением в практику аэросъемки нового класса носителей – беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Кроме того, недостаточное внимание уделено анализу, в частности, пространственных свойств объектов ДЗЗ, проявляющихся в конкретных условиях оптико-электронной съемки с борта носителя БСК. Частные результаты по исследованию пространственных свойств одиночных и групповых объектов ДЗЗ изложены в опубликованных работах [3, 4].

Таким образом, тема работы, посвященной исследованию принципов использования технологии дистанционного зондирования с воздушных носителей в интересах информационного обеспечения инфраструктур пространственных данных за счет разработки фотопланов и ортофотопланов местности, является актуальной.

МОДЕЛИ СРЕДСТВ МАРШРУТНОЙ АЭРОСЪЕМКИ

Основным видом аэросъемки, результаты которой обеспечивают формирование фотопланов и ортофотопланов участков земной поверхности, является плановая аэросъемка [1]. При плановой съемке заданного участка земной поверхности с определенными требованиями необходимо получить непрерывное поле изображений. В отдельном маршруте съемки непрерывное изображение участка земной поверхности, размеры которого превосходят поле зрения БСК в условиях аэросъемки, формируется на основе одного из видов оптико-электронной съемки. К основным используемым на практике видам съемки относятся сканерная съемка и кадровая съемка (рис. 1). Сканерная съемка обеспечивается использованием БСК, разработанных на основе линейных фотоприемных устройств (ФПУ), и соответствующих гиостабилизированных платформ, компенсирующих в полете нестабильность носителя. По этим причинам для выполнения сканерной съемки используется пилотируемая авиация, фюзеляж которой оборудован герметизированным фотолюком и позволяет разместить крупногабаритное оборудование. При сканерной съемке за промежуток времени, соответствующий времени экспозиции ФПУ, регистрируется малый участок земной поверхности, соответствующий проекции светочувствительной области ФПУ (рис. 1, б).

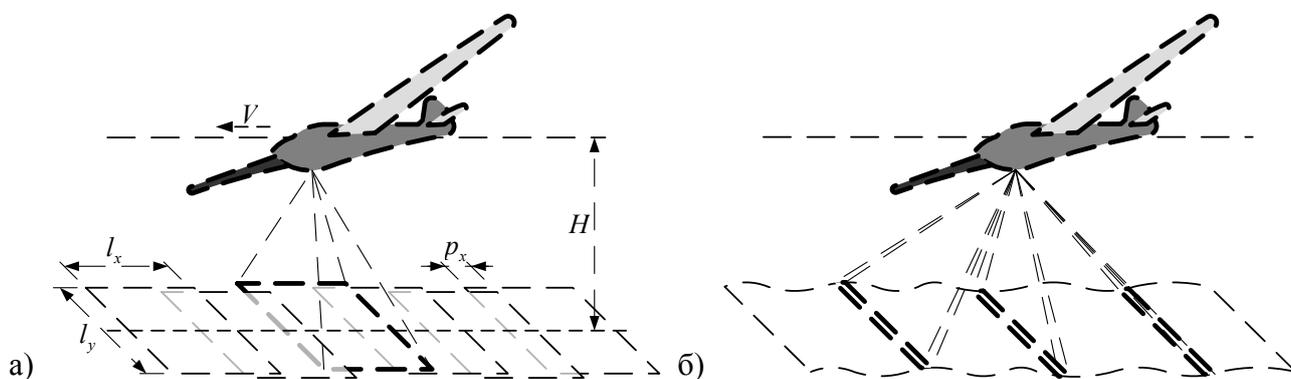


Рис. 1. Схема регистрации и параметры снимков при разных видах съемки маршрутов: а – кадровая съемка; б – сканерная съемка

При кадровой съемке используются БСК, основанные на матричных ФПУ, и при наличии возможности – легкие и малогабаритные стабилизирующиеся подвесы. Указанная особенность позволяет использовать кадровые БСК для съемки с воздушных носителей легкого класса, в частности, с борта БПЛА. При кадровой съемке за промежуток времени, соответствующий времени экспозиции ФПУ, регистрируется участок земной поверхности, характеризующийся существенно большим пространственным охватом по сравнению с аналогичным элементарным участком сканерной съемки (рис. 1, а).

Ограничение настоящего исследования состоит в анализе условий использования одного из указанных видов съемки – плановой кадровой съемки, при ведении которой соблюдаются требования к фотограмметрическому качеству аэроснимков и компенсируется угол сноса [1]. В первом приближении параметры подвижного воздушного носителя при выполнении плановой съемки равнинной местности описываются набором данных, включающим высоту аэросъемки над средней плоскостью H и путевая скорость полета V (рис. 1, а). На практике при штатной эксплуатации воздушных средств рекомендуется выдерживание скорости полета V в пределах определенного интервала, чем обеспечивается стабильность и безопасность полета с сохранением управляемости средства. Вследствие этого соблюдение условий оптико-электронной съемки целесообразно обеспечивать за счет изменения высоты аэросъемки.

В свою очередь, параметры оптико-электронного кадрового БСК, обеспечивающего получение изображений с требуемым пространственным разрешением во всем диапазоне изменения высоты полета, представляются набором данных о размерах светочувствительной области матричного ФПУ a_x и a_y , ориентированного по направлению полета воздушного средства, и фокусным расстоянием объектива БСК f .

По значениям параметров носителя и БСК для условий плановой съемки оцениваются длины сторон аэроснимка на местности вдоль l_x и поперек l_y маршрута:

$$l_x = a_x \frac{H}{f}; \quad l_y = a_y \frac{H}{f}.$$

Результаты расчета длин сторон аэроснимка на местности при использовании оптико-электронного БСК с полнокадровой матрицей ($a_x = 24$ мм, $a_y = 36$ мм) и со средним фокусным расстоянием объектива $f = 50$ мм представлен на рис. 2.

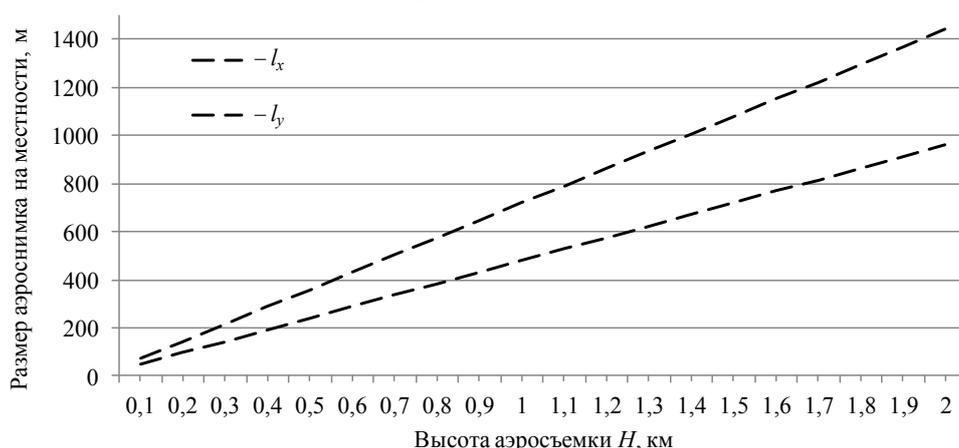


Рис. 2. Графики зависимости длины стороны аэроснимка на местности от высоты съемки

Для обеспечения непрерывности данных о земной поверхности, регистрируемых на маршруте съемки, плановая кадровая съемка выполняется с продольным перекрытием снимков p_x , измеряемом в процентах по отношению к длине стороны аэроснимка l_x .

При решении задачи разработки фотоплана местности значение продольного перекрытия p_x определяется с учетом нестабильности носителя и ошибки наведения БСК в надир. Таким образом, по результатам аэросъемки требуется, в основном, однократное покрытие объекта аэроснимками. В таком случае, перекрытие имеет место на границах аэроснимков и соответствует локальному двукратному покрытию объекта материалами аэросъемки.

Исходя из требований к обеспечению фотограмметрической обработки для формирования непрерывного ортофотоплана местности необходимо, чтобы изображение каждой точки объекта съемки присутствовало, как минимум, на двух аэроснимках. Традиционно, значение продольного перекрытия p_x выбирается в зависимости от рельефа местности не менее 60 % [1, 2]. В таких условиях, с одной стороны, обеспечивается двукратное покрытие объекта аэроснимками, а с другой стороны – минимизируется исходный объем снимков для фотограмметрической обработки, выполнявшейся в период актуальности указанного требования с применением визуально-инструментальных методов. В настоящее время выполнение фотограмметрических работ основано на методах цифровой обработки изображений, обеспечивших автоматизацию основных трудоемких операций, в частности, по поиску соответствий снимков и определению связующих точек. В силу этого для повышения качества результатов цифровой фотограмметрической обработки рекомендуется перекрытие снимков до 90 % [5].

Возможные максимальное число n_x'' и минимальное число n_x' снимков, покрывающих точку идеального маршрута съемки, рассчитываются по формулам:

$$n_x'' = \left\lceil \frac{100}{100 - p_x} \right\rceil; \quad n_x' = n_x'' - 1,$$

где $\lceil \cdot \rceil$ – операция округления числа в сторону большего целого значения.

Диаграммы зависимости показателей n_x'' и n_x' от значения продольного перекрытия p_x представлены на рис. 3.

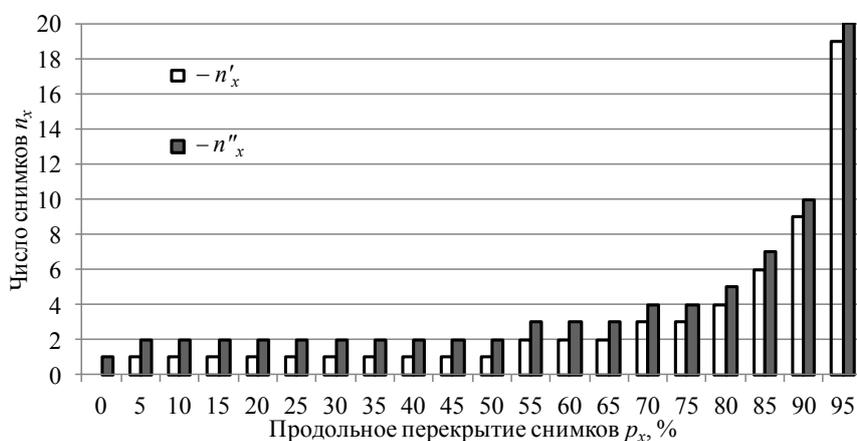


Рис. 3. Диаграмма зависимости числа снимков на точку маршрута съемки от значения продольного перекрытия p_x

Результаты расчета n_x'' и n_x' показывают, что в результате плановой кадровой съемки при высоких значениях продольного перекрытия (от 80 до 90 %) изображение точки маршрута может присутствовать на 4–10 снимках (рис. 3).

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АЭРОСЪЕМКИ

Объектом аэросъемки являются участок или участки земной поверхности с четко определенными границами [1]. Объекты в заданных условиях аэросъемки предлагается классифи-

цировать на малоразмерные (точечные), протяженные (линейные) и крупноразмерные (площадные) по результату сравнения длины l'_o и ширины l''_o объекта с длинами сторон аэроснимка на местности вдоль l_x и поперек l_y маршрута.

Параметры объекта l'_o и l''_o определяются следующим образом (рис. 4). Длина объекта l'_o – это длина отрезка L' , формируемого наиболее удаленными точками границы объекта. Ширина объекта l''_o – это длина отрезка L'' , перпендикулярного отрезку L' и формируемого наиболее удаленными точками границы объекта.

Формальные описания критериев для определения класса объекта съемки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии классификации объектов аэросъемки

Класс объекта аэросъемки	Критерий определения класса объекта аэросъемки
Малоразмерный объект	$(l'_o < l_x) \wedge (l''_o < l_y)$
Протяженный объект	$(l'_o > l_x) \wedge (l'_o > l_y) \wedge (l''_o < l_x) \wedge (l''_o < l_y)$
Крупноразмерный объект	$(l''_o > l_x) \wedge (l''_o > l_y)$

Для формирования базовых пространственных данных по малоразмерным, протяженным и крупноразмерным объектам целесообразно применение одинарной, маршрутной и многомаршрутной кадровых аэросъемок соответственно [1]. Произвольные объекты разных классов и границы покрывающих их аэроснимков представлены на рис. 4.

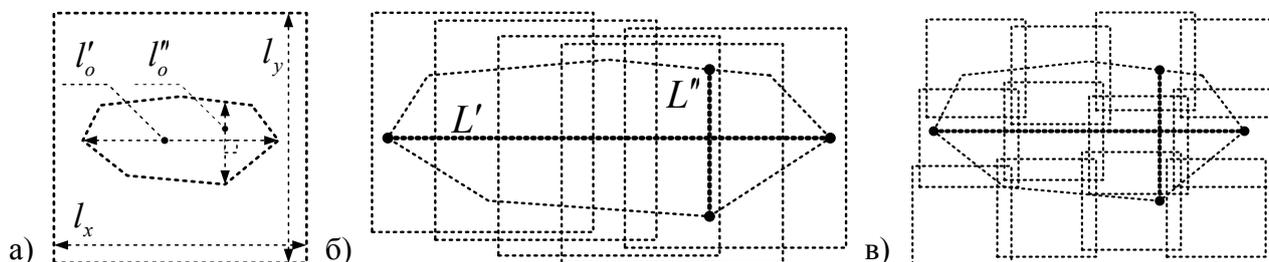


Рис. 4. Примеры объектов аэросъемки разных классов:

а – малоразмерный объект; б – протяженный объект; в – площадной объект

Из указанных видов аэросъемки частный практический интерес представляет маршрутная кадровая съемка протяженных объектов, в качестве реальных примеров которых рассматриваются элементы транспортной инфраструктуры, гидротехнические сооружения, объекты гидрографии и их элементы.

ЭЛЕМЕНТЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ПЛАНИРОВАНИЯ АЭРОСЪЕМКИ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Известными показателями качества процесса организации и ведения аэросъемки являются съемочная производительность и валовая производительность [2]. Съемочная производительность E_S определяется количеством сфотографированной площади S к съемочному времени t_S , под которым понимается непосредственно затраченное на съемку время. В свою очередь, валовая производительность E_G – это отношение сфотографированной площади S

к общему времени полета $t_G = t_S + t_O$, где t_O – время, затрачиваемое на полет без ведения съемки.

Количество сфотографированной площади при маршрутной кадровой съемке протяженных объектов приблизительно оценивается по формуле

$$S = l_y \cdot V \cdot t_S.$$

В таком случае съемочную E_S и валовую E_G производительности предлагается рассчитывать по формулам

$$E_S = \frac{S}{t_S} = l_y \cdot V; \quad E_G = \frac{S}{t_G} = l_y \cdot V \frac{t_S}{t_G} = E_S \frac{t_S}{t_G}.$$

Съемочная производительность E_S при постоянных условиях съемки не зависит от числа объектов, фотографируемых за один вылет воздушного средства. В свою очередь, валовая производительность E_G^I в результате съемки I числа протяженных объектов определяется по формуле

$$E_G^I = \frac{1}{t_G} \sum_{i=1}^I S^i = \frac{V \cdot l_y}{t_G} \sum_{i=1}^I t_S^i,$$

где i – порядковый номер объекта аэросъемки, $i = 1(1)I$.

Примеры расчета съемочной E_S и валовой производительностей E_G в результате условно-реальных аэросъемочных работ при разном соотношении t_S и t_G , $V = 200$ км и $l_y = 500$ м представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета производительности аэросъемочных работ

t_G , ч	t_S/t_G	t_S , ч	S , км ²	E_G , км ² /ч	E_S , км ² /ч
1	1/4	0,25	25	25	100
	1/2	0,5	50	50	
	3/4	0,75	75	75	
3	1/4	0,75	75	25	
	1/2	1,5	150	50	
	3/4	2,25	225	75	
5	1/4	1,25	125	25	
	1/2	2,5	250	50	
	3/4	3,75	375	75	

В силу того, что в кадровых БСК, используемых для аэросъемочных работ, применяются крупноформатные матричные ФПУ с большим числом ячеек (от десятков миллионов до сотни миллионов), одно из ограничений условий аэросъемки состоит в невысоком быстродействии аппаратуры. У соответствующих БСК при реализации продолжительной интервальной съемки максимальная частота регистрации отдельных кадров ν_{\max} составляет единицы герц. В результате, по причине использования сверхкоротких выдержек, составляющих тысячные доли секунды (например, 1/1000, 1/2000, 1/4000), для регистрации резких изображений в динамических условиях полета воздушного носителя допускается, что частота ν_{\max} обратно пропорциональна минимальному интервалу аэросъемки t_{\min} – интервалу времени между моментами начала выдержек двух последовательных кадров, определяющему величину продольного перекрытия p_x [1].

В том случае, когда при выполнении аэросъемки требуется обеспечить перекрытие снимков не меньше заданного значения p_x , необходимо определить минимальную высоту аэросъемки H_{\min} с рекомендуемой скоростью V . При условии ограниченного быстродействия БСК необоснованное снижение высоты полета носителя может привести к уменьшению продольного перекрытия p_x . В результате регистрируются непригодные для фотограмметрической обработки аэроснимки, характеризующиеся недостаточным фотограмметрическим качеством. Для оценивания минимально допустимой высоты аэросъемки H_{\min} предлагается следующая формула

$$H_{\min} = \frac{100 \cdot V \cdot f}{a_x \cdot v_{\max} (100 - p_x)} = \frac{100 \cdot V \cdot f \cdot t_{\min}}{a_x (100 - p_x)}$$

На рис. 5 представлен пример расчетов минимально допустимой высоты аэросъемки H_{\min} для следующих параметров носителя и БСК: $V = 200$ км/ч, $f = 50$ мм, $a_x = 24$ мм.

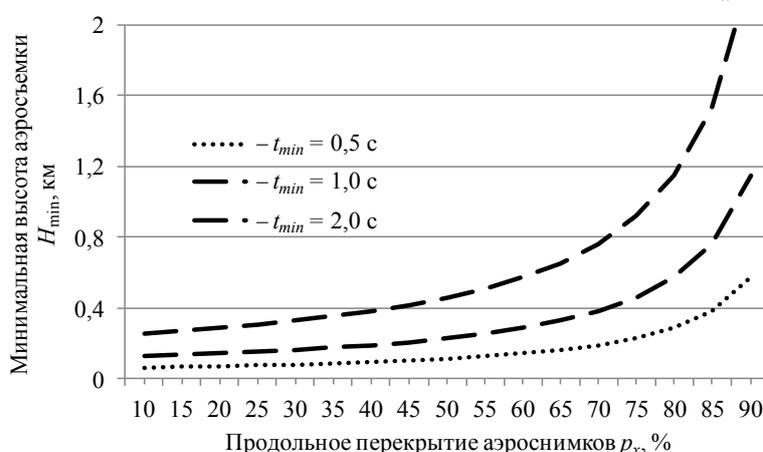


Рис. 5. Зависимость минимальной высоты аэросъемки H_{\min} от продольного перекрытия p_x при разных значениях минимального интервала аэросъемки t_{\min}

Получаемые таким образом зависимости целесообразно анализировать при планировании аэросъемки и при формировании полетного задания в силу того, что они позволяют оценить частные условия регистрации аэроснимков с требуемым фотограмметрическим качеством в отношении обеспечения заданного продольного перекрытия.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО РАЗРАБОТКЕ БАЗОВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ О ПРОТЯЖЕННОМ ОБЪЕКТЕ

Представленные результаты позволяют строго классифицировать объект аэросъемки, оценивать производительность и анализировать частные условия при планировании съемки, выполняемой для получения базовых пространственных данных. В рамках работы основное внимание уделяется аэросъемке протяженных объектов. В силу этого целесообразно исследовать возможность выполнения фотограмметрической обработки реальных аэроснимков, полученных в результате маршрутной кадровой съемки протяженного объекта.

В качестве исходных данных использованы свободно распространяемые материалы аэросъемки с БПЛА, полученные в рамках проекта U.S. Geological Survey National Unmanned Aircraft Systems (UAS) [6]. Протяженный объект аэросъемки представляет собой береговую линию (рис. 6). Цель эксперимента состоит в разработке базовых пространственных данных

в виде ортофотоплана местности. В настоящее время указанная задача может решаться с использованием программного обеспечения фотограмметрической обработки данных ДЗЗ, разработанного отечественными и зарубежными организациями, в частности: Leica Geosystems, Pix4D S.A., Agisoft LLC, Bentley Systems и др.

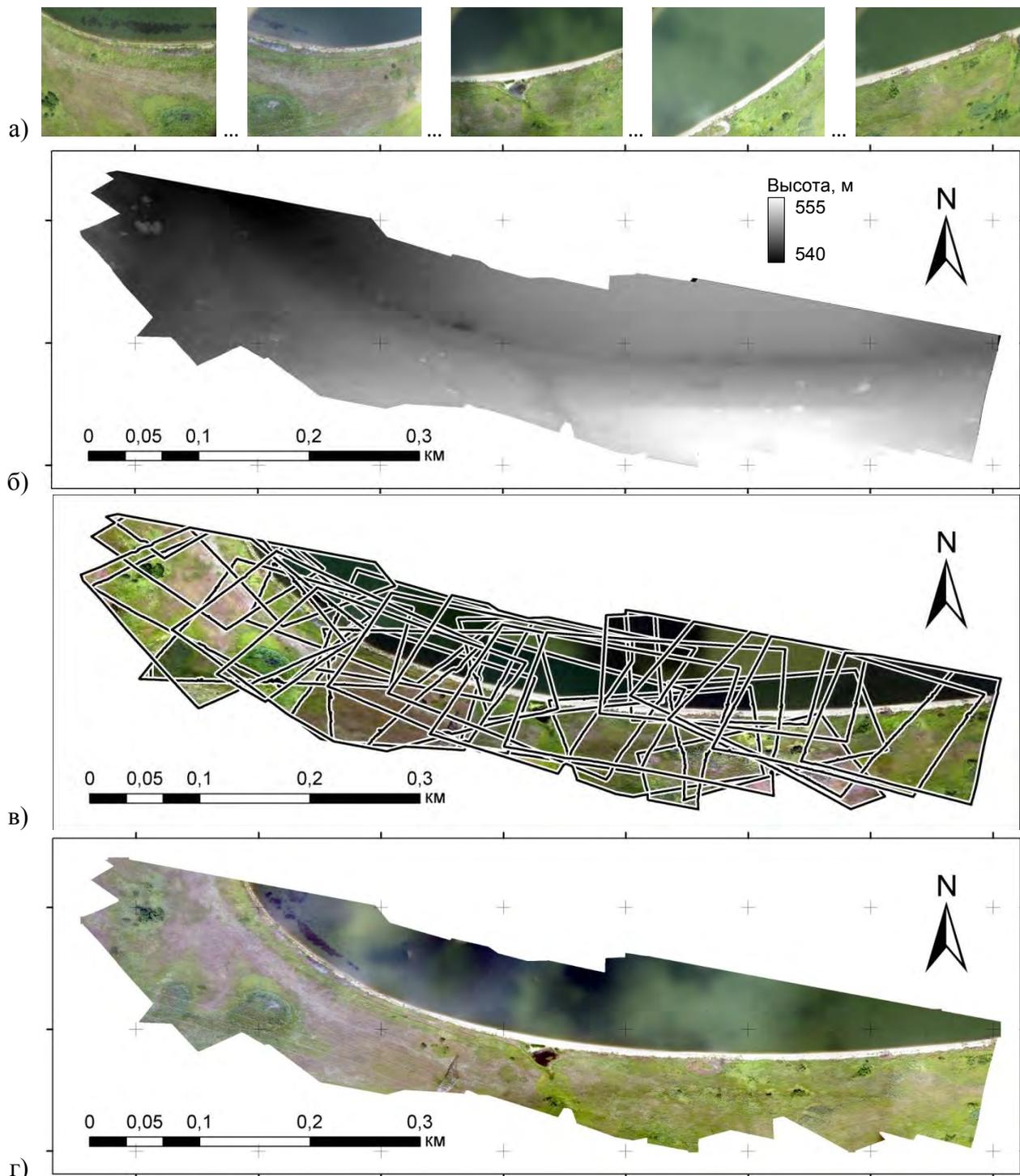


Рис. 6. Пространственные данные об участке протяженного объекта, получаемые на основных этапах фотограмметрической обработки:
а – примеры исходных аэроснимков; б – цифровая модель местности;
в – ортотрансформированные снимки; г – фрагмент ортофотоплана

В рассматриваемой реализации эксперимента использованы аэроснимки, полученные в результате выполнения двух встречных маршрутов над береговой линией. Существенные вариации ориентации и положения снимков в маршруте обусловлены нестабильностью полета носителя оптико-электронного БСК, в качестве которого использовался БПЛА легкого класса, разработанный по вертолетной схеме. Примеры исходных снимков, зарегистрированных БСК с матричным ФПУ (12 Мп, 4000×3000 элементов), представлены на рис. 6, а.

Успешная реализация основных этапов фотограмметрической обработки (рис. 6, б–г) подтвердила возможность формирования ортофотоплана по материалам маршрутной кадровой аэросъемки протяженного объекта, при которой для последовательных снимков обеспечивалось продольное перекрытие 70–90 %. В качестве основных продуктов фотограмметрической обработки, представляющих прикладной интерес в типовых задачах информационного обеспечения инфраструктур пространственных данных, получены цифровая модель и ортофотоплан местности (рис. 6, б, г), характеризующиеся пространственным разрешением приблизительно 5 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе на основе введенных обобщенных моделей воздушных средств ДЗЗ рассмотрены отдельные принципы исследования условий и возможностей аэросъемочных систем, функционирующих на основе кадровых оптико-электронных БСК. Предложенные критерии определения класса объекта аэросъемки обеспечивает формальный анализ пространственных свойств объекта с учетом условий аэросъемки и выбор типа кадровой съемки. Разработаны подходы к оцениванию производительности аэросъемочных работ и к анализу частных условий съемки при планировании полетов над протяженным объектом. Потенциальная возможность получения базовых пространственных данных в виде цифровой модели и ортофотоплана местности подтверждена выполненным экспериментом по фотограмметрической обработке материалов маршрутной кадровой аэросъемки. Полученные результаты характеризуются прикладной ценностью для реализации информационного обеспечения инфраструктур пространственных данных.

Список используемых источников

1. Аэрофотосъемочные работы: справочник аэрофотосъемщика / А.А. Попов, Ю.И. Полетаев, Ю.В. Евдокимов и др. – М.: Транспорт. 1984. – 200 с.
2. Руководство по аэросъемочным работам / Ю.И. Полетаев и др. – М.: Воздушный транспорт, 1988. – 336 с.
3. Григорьев А.Н., Замарин А.И., Караваев М.Н. Метод формирования групповых объектов для космических средств дистанционного зондирования Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 587–594.
4. Григорьев А.Н., Дмитриков Г.Г. Пространственная модель и показатели свойств объектов дистанционного зондирования из космоса // Труды всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2017)». – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. – С. 78–81.
5. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan Professional Edition, версия 1.2. – СПб.: Agisoft LLC, 2016. – 113 с.
6. U.S. Geological Survey Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap 2014: U.S. Geological Survey Open-File Report 2015-1032 / J. Cress, M. Hutt, J. Sloan, M. Bauer, M. Feller, S. Goplen. – 60 p.

В.М. Антошина

АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», г. Москва;

А.М. Казанцев

АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», г. Москва;

А.П. Линкевичиус

кандидат техн. наук

АО «РТИ», г. Москва

АГРЕГИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДАЛЬНЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ КРУПНОБЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ

В статье представлены особенности РЛС дальнего обнаружения нового поколения как многоуровневой системы крупноблочной структуры. Показано, что декомпозиция РЛС дальнего обнаружения на крупные функциональные системы позволяет определить перечень конструктивных элементов, обеспечивающих решение задач функциональных систем, обеспечив, таким образом, не конструктивное, а функционально-конструктивное деление РЛС. Рассмотрены динамические и статические методы и модели, использование которых возможно при расчете надежности таких сложных технических систем, как РЛС дальнего обнаружения. Приведены факторы, обуславливающие недостаточность использования только статистических моделей расчета параметров надежности РЛС ДО. Показано, что для наиболее точной оценки показателей надежности РЛС дальнего обнаружения необходимо применять агрегирование статистических и динамических моделей расчета.

Ключевые слова: радиолокационная станция дальнего обнаружения, функционально-конструктивная матрица, показатель надежности, динамическая и статическая модель, техническое обслуживание.

ВВЕДЕНИЕ

Современные РЛС дальнего обнаружения (РЛС ДО) являются сложными наукоемкими изделиями радиоэлектронной техники, воплощающими новейшие достижения в области информационных технологий радиоэлектронных систем. Они отличаются, прежде всего, тем, что в них реализованы технические характеристики и функциональные возможности, близкие к предельно достижимым на период их создания [1].

Постоянное возрастание требований, предъявляемых к решению задач воздушно-космической обороны, обуславливает необходимость непрерывного совершенствования как самих РЛС ДО, так и методов обработки радиолокационной информации. Реализация современных требований к РЛС ДО предполагает существенное улучшение их тактико-технических характеристик и расширение функциональных возможностей, а также развитие средств их информационного взаимодействия в составе создаваемых комплексов [2]. Организация структуры РЛС ДО в виде функционально-конструктивной матрицы ставит задачи разработки новых методов оценки надежности изделия. Таким образом, целью статьи является разработка новой модели оценки показателей надежности РЛС ДО крупноблочной структуры.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДАЛЬНЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Одной из ключевых задач, решение которой определяет эффективность создания РЛС ДО нового поколения, является определение ее структуры [5, 6]. Традиционно в соответствии с нормативными документами, принятыми при разработке образцов военной техники (ВВТ), формализация структуры создаваемого образца производится в виде схемы деления, т. е.

определяется его конструктивная структура, обеспечивающая достижение требуемых тактико-технических характеристик.

В работе [2] был предложен другой подход, согласно которому определение структуры РЛС ДО осуществляется на основе декомпозиции тактико-технических требований, предъявляемых заказчиком, на крупные функциональные системы, позволяющие определить номенклатуру функциональных задач, решаемых РЛС ДО.

Таких задач для РЛС ДО нового поколения десять. К их числу можно отнести:

- функциональную систему целевого канала;
- функциональную систему помехового канала;
- функциональную систему передачи данных и связи;
- передающую функциональную систему;
- приемную функциональную систему;
- функциональную систему управления;
- функциональную систему контроля;
- функциональную систему синхронизации;
- функциональную систему отображения информации;
- функциональную систему инженерного комплекса.

Такая крупноблочная декомпозиция позволяет определить перечень конструктивных элементов, обеспечивающих решение указанных функциональных задач, определив, таким образом, не конструктивное, а функционально-конструктивное деление РЛС ДО.

Двухмерное функционально-конструктивное деление РЛС ДО, в отличие от одномерного конструктивного деления, может быть формализовано в виде функционально-конструктивной матрицы. По одной координате данной матрицы расположены функциональные системы (ФС), т. е. функционально законченная совокупность конструктивных составных частей (включая ФПО), обеспечивающих решение функциональной задачи в рамках РЛС ДО, а по другой – конструктивные элементы РЛС ДО. При этом ФС может обладать свойством перестроения своей структуры для рационального решения тактических и/или технических задач при изменении условий эксплуатации [6].

Такое описание структур РЛС ДО позволяет также по-новому определить и показатели ее надежности. Традиционно надежность изделия определяется на основании надежности его конструктивных составных частей, а схема надежности изделия составляется из соединенных между собой его конструктивных элементов. С другой стороны, ТТЗ на РЛС ДО определяет надежность функционирования изделия как выполнение (решение) им всех заданных для изделия функциональных задач, отказ изделия определяется как невозможность решения изделием любой функциональной задачи из заданных ТТЗ.

Таким образом, когда для РЛС ДО составлена функционально-конструктивная матрица, становится возможным по-другому определить показатели ее надежности и составить схему надежности изделия.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДАЛЬНЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Показатель надежности – это техническая характеристика, количественным образом определяющая одно или несколько свойств, составляющих надежность объекта. Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени данному объекту или данной группе объектов присущи определенные свойства, обуславливающие надежность.

Определение показателей надежности РЛС ДО основывается на двух классах моделей: динамических, когда события и отказы рассматриваются как процессы, развивающиеся во времени; статических, в которых состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в определенный момент времени.

В рамках статических моделей анализ надежности может проводиться:

- методами, использующими основные формулы теории вероятностей и комбинаторики;
- методами, основанными на записи логических условий через состояния элементов системы с последующим применением теории алгебры логики.

Классические статические модели для восстанавливаемых систем позволяют рассчитывать лишь дифференциальные (мгновенные) показатели надежности, определяемые в момент времени t (коэффициент готовности, параметр потока отказов, средняя эффективность в момент времени t).

При расчете показателей надежности РЛС ДО как многомерных и сложных структур целесообразно использовать логико-вероятностные методы, в которых структура системы описывается средствами математического аппарата бинарной алгебры логики, а количественная оценка надежности производится с помощью теории вероятностей.

С точки зрения теории надежности РЛС ДО – это типичная восстанавливаемая система непрерывного длительного действия. Выходной эффект РЛС ДО пропорционален суммарной продолжительности ее пребывания в работоспособном состоянии, поэтому наиболее обоснованным комплексным показателем ее надежности является коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ [8], который характеризует как временную неработоспособность, обусловленную состояниями контролируемого отказа и последующего восстановления, так и простой объекта $\tau_{ТО}$, связанные с техническим обслуживанием.

Показатель надежности $K_{ТИ}$ определяется как отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных ТО $\tau_{ТО}$ и ремонтом $\tau_{В}$ за тот же период [8]. Если обозначить символом T рассматриваемый период эксплуатации $T = T_0 + \tau_{В} + \tau_{ТО}$, где T_0 – значение средней наработки на отказ, то $K_{ТИ}$ можно определить как

$$K_{ТИ} = 1 - \frac{\tau_{В} + \tau_{ТО}}{T}.$$

Альтернативой использованию $K_{ТИ}$ является применение коэффициента готовности $K_{Г}$, который определяется следующим образом:

$$K_{Г} = 1 - \frac{\tau_{В}}{T}.$$

В качестве дополнительного показателя надежности компонентов РЛС ДО целесообразно использовать либо время наработки на отказ T_0 , либо ВБР $P(t)$. Для РЛС ДО, как изделия электронной техники, на этапе нормальной эксплуатации характерен экспоненциальный закон распределения случайного времени наработки на отказ с параметром интенсивности отказов $\lambda = 1/T_0$ [9]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}.$$

При этом заданное заказчиком требование для величины ВБР $P^{зад}$ определяется в техническом задании как

$$P(t) \geq P^{зад}.$$

Указанные характеристики служат показателями надежности РЛС ДО и их компонентов, имеющими ключевое значение для реализации ТО по состоянию.

Необходимо отметить, что логико-вероятностные методы позволяют вычислять лишь мгновенные показатели (показатели в момент времени t). Для многоуровневых логико-вероятностных моделей вычисляемыми показателями являются вероятность нахождения системы в момент времени t в заданном логическом выражении подмножестве состояний и параметр потока переходов в это или дополнительное подмножество состояний, т. е., для си-

стем с независимыми отказами и восстановлением элементов принципиально могут вычисляться лишь коэффициент готовности и параметр потока отказов.

Таким образом, расчет параметров надежности РЛС ДО только при помощи статистических моделей не достаточен, что обуславливается следующими факторами [7]:

- наличием нескольких уровней эффективности функционирования (производительности) в работоспособных состояниях и постепенной деградацией по эффективности при возникновении неисправностей; состояния неработоспособности могут также различаться последствиями;

- реализацией разнообразных способов резервирования;

- использованием различных стратегий восстановления, ограничением на ЗИП и число ремонтных бригад;

- возможностью возникновения нескольких несовместимых видов отказов элементов РЛС ДО, приводящих при определенной кратности и последовательности возникновения к различным последствиям на системном уровне, наличием скрытых и явных отказов.

Учет перечисленных факторов возможен за счет использования динамических моделей. В рамках динамических моделей могут применяться:

- моделирование систем марковскими, полумарковскими процессами;

- методы теории восстановления, полумарковских и регенерирующих процессов;

- статическое имитационное моделирование.

Наиболее распространенными динамическими моделями «надежностного» поведения сложных систем являются марковские процессы.

Для РЛС ДО как сложной системы с восстановлением основным аппаратом исследования надежности являются однородные марковские процессы с дискретным множеством состояний и непрерывным временем, так как они позволяют получать аналитические выражения или вычислительные схемы для расчета различных показателей надежности. Кроме того, исходными данными для элементов могут быть либо константные интенсивности отказов, либо средние наработки до отказа.

На основе информации о структуре и принципах функционирования исследуемой ФС определяется множество ее возможных состояний.

Изделие считается работоспособным, если по результатам проведения тестов функционального или оперативного контроля оно способно решать поставленную задачу. При этом функциональность изделия может являться ограниченной в заданных пределах.

Чтобы конкретизировать простейшую модель надежности ФС с учетом контроля, выделим три состояния:

- состояние 1 – полная работоспособность ФС (с заявленными ТТХ);
- состояние 2 – состояние неработоспособности после возникновения отказа, обнаруженного средствами контроля (которое допускает восстановление работоспособности),
- состояние 3 – состояние неработоспособности после отказа, не обнаруженного средствами контроля.



Рис. 1. Марковский граф переходов

Таким образом, состояние 1 соответствует работоспособности ФС, а 2 и 3 – неработоспособные состояния. Далее строится марковский граф переходов, вершинами которого являются состояния системы, а ребрами – возможные переходы между состояниями.

Интенсивности переходов определяются характеристиками безотказности и ремонтпригодности элементов системы. По графу переходов составляется необходимая система уравнений, аналитическое решение которой позволяет получить формульные выражения для требуемых показателей надежности.

Для количественной оценки будем считать, что статистика отказов является экспоненциальной с суммарной интенсивностью отказов λ . При этом если глубина контроля равна η , то интенсивность переходов из работоспособного состояния 1 в состояние 2 задается интенсивностью $\lambda \cdot \eta$, а в состояние 3 – интенсивностью $\lambda \cdot (1 - \eta)$. Скорость восстановления из состояния 2 в состояние 1 определим как μ .

В этом случае соответствующая марковскому графу (рис. 1) система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} P1(t) &= -\lambda \cdot P1(t) + \mu \cdot P2(t), \\ \frac{d}{dt} P2(t) &= \eta \cdot \lambda \cdot P1(t) - \mu \cdot P2(t), \\ \frac{d}{dt} P3(t) &= (1 - \eta) \cdot \lambda \cdot P1(t).\end{aligned}$$

В результате в процессе разработки моделей надежности РЛС ДО возникает противоречие, связанное со стремлением учета существенных факторов, определяющих надежность системы, с одной стороны, и необходимостью преодоления большой размерности – с другой. Поэтому при построении марковских моделей обычно не рассматривают все множество возможных состояний системы, а стараются или удалить некоторые состояния, исходя из условий функционирования системы, и/или укрупнить (объединить) некоторые группы состояний в одно.

Применительно к РЛС ДО проводится ее декомпозиция на составные части с формированием функционально-конструктивной матрицы, построение моделей выделенных частей и агрегирование полученных моделей в общую модель для дальнейшего расчета показателей надежности и их применении при реализации технического обслуживания по состоянию.

В частности, наиболее простой моделью безотказности РЛС ДО является последовательное соединение ее элементов, соответствующее случаю, когда все компоненты функционально-конструктивной матрицы функционально необходимы и отказ любого из них приводит к отказу системы в целом. В этом случае выражение для оценки интенсивности отказов может быть представлено в виде суммы:

$$\lambda = \sum_{j=1}^M \lambda_j,$$

где λ_j – интенсивность отказов j -й подсистемы, входящей в состав функционально-конструктивной матрицы, включающей общее число M элементов: $j = 1, \dots, M$.

В тех функциональных элементах, где используется более сложное взаимодействие элементов, которое описывается той или иной схемой резервирования, необходимо применять логико-вероятностные методы, опирающиеся на блок-схемы надежности и марковские модели [7]. Например, динамические модели позволяют вычислять все основные показатели надежности – мгновенные, интервальные (вероятность безотказной работы (отказа) на интервале времени), независимые от времени стационарные показатели (средняя наработка между отказами, среднее время простоя).

Задача адекватного моделирования надежности систем сложной структуры решается только с помощью декомпозиции системы (структурной, логической, по процессам) и применения различных расчетных методов к выделенным частям. Однако моделирование даже выделенных частей сложных систем порождает известные проблемы размерности (рост про-

странства состояний модели и связей между состояниями) и, как следствие, невозможность ручного входного описания модели, определения ее параметров, выполнения расчетов. Проблема может быть решена только с помощью автоматизации, причем программное обеспечение анализа надежности и безопасности должно включать в себя всю совокупность методов как статических, так и динамических моделей.

Основой для построения модели надежности системы является четкое понимание вариантов ее функционирования. Согласно функционально-конструктивной матрице РЛС ДО можно построить структурные схемы всех ФС. Исходя из априорной информации о РЛС ДО, можно провести предварительную оценку надежности логико-вероятностными методами.

Предварительный расчет надежности уточняется в процессе эксплуатации изделия. Интеллектуальная система встроенного контроля позволяет в режиме реального времени получать данные о техническом состоянии всех элементов РЛС ДО. На основе полученной статистики, достаточной для выявления зависимостей отказов от различных факторов, можно получить более достоверные оценки надежности и прогнозировать возникновение отказов.

Разработку алгоритма прогнозирования вероятности отказов по данным системы встроенного контроля целесообразно осуществлять с использованием методов машинного обучения [10]. Данные методы включают обучение по прецедентам, которое предполагает, что модель на основе комплексного анализа обучающей выборки из ретроспективных и текущих значений параметров научится формировать прогнозное значение характеристики готовности компонента РЛС ДО.

Для этого предлагается обрабатывать массив данных о текущем состоянии РЛС, который мы условно обозначаем вектором $\mathbf{X}(t)$, зависящим от времени. Также имеется информация по отказам и инцидентам, которая накапливается в рамках испытаний и эксплуатации РЛС, которая пересчитывается в показатели надежности ее компонентов и синхронизируется с X . На основе обучающей выборки (X, P) можно разработать алгоритм прогнозирования параметров надежности, в частности, K_{Γ} путем построения регрессии $P(X)$ и классификации (т. е. принятия решения о заявке на обслуживание определенного компонента).

Исходные данные для формирования вектора $\mathbf{X}(t)$ представляют собой матрицу, каждая строка которой содержит набор показаний определенного компонента РЛС от системы встроенного контроля и результат оценки текущего K_{Γ} , принимающего значения 1 – в случае гарантированной работоспособности компонента, 0 – в случае отказа.

Для получения оценки K_{Γ} в заданные моменты времени используется метод скользящего усреднения [11], суть которого заключается в том, что для каждого значения аргумента производится расчет среднего значения по нескольким соседним данным. Число точек w , участвующих в расчете такого среднего, называется окном скользящего усреднения. В простейшем случае расчет производится по формуле

$$K_{\Gamma}(t_i) = \frac{\sum_{j=i}^{i+w-1} K_{\Gamma_j}}{w}.$$

Таким образом, машинное обучение связано с решением задач классификации и регрессии. В простейшем случае линейной регрессии искомый алгоритм $a(X)$

$$Y = a(X) = w_0 + \sum_{j=1}^d w_j x^j$$

минимизирует ошибку

$$Q(w, X) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (\langle w, x_i \rangle - Y_i)^2.$$

Для практической реализации машинного обучения прогнозирование состояния определенного уровня РЛС с учетом нижестоящих элементов применяется алгоритм градиентного

бустинга – процедура последовательного построения композиции алгоритмов машинного обучения, когда каждый следующий алгоритм стремится компенсировать недостатки композиции всех предыдущих алгоритмов, где в качестве исходных данных на вход будет подана таблица, начиная с нижнего уровня, характеризующая состояние РЛС в зависимости от N набора параметров.

При помощи такой модели с постоянным дообучением на данных, собираемых в режиме реального времени, возможно решение задачи точного предсказания состояния РЛС ДО или ее элементов на длительном промежутке времени.



Рис. 2. Схема агрегирования статических и динамических моделей для оценки надежности РЛС ДО крупноблочной структуры

Агрегирование статических и динамических моделей для оценки надежности РЛС ДО крупноблочной структуры дает возможность оценивать как мгновенные показатели в момент времени t , так и интервальные, определяемые на бесконечности (например, среднюю наработку), что позволяет реализовать наиболее эффективное ТО по состоянию.

Таким образом, для реализации технического обслуживания РЛС ДО по состоянию с использованием агрегирования статических и динамических моделей расчета показателей необходимо (рис. 2):

1. На основе анализа технических требований к РЛС ДО нового поколения построить функционально-конструктивную матрицу на основе декомпозиции РЛС ДО на крупные функциональные системы, решающие свои конкретные функциональные задачи, и соответственно, определить перечень конструктивных элементов, обеспечивающих их решение.

2. Используя априорную информацию со стенда генерального конструктора, в том числе информацию по компонентам РЛС ДО предыдущих поколений, и данных систем встроенного контроля, определить вид и критичность отказов компонентов РЛС ДО.

3. На основе поступающей информации провести анализ ретроспективных данных по блоку с целью выявления наиболее значимых блоков, отказ которых ведет к отказу системы, а также поиск статистически значимых взаимосвязей между параметрами.

4. В дальнейшем в схему включаются динамические операторы, учитывающие развитие процесса возникновения базовых событий во времени, где данные системы встроенного контроля служат исходными данными для алгоритма машинного обучения.

5. Провести анализ скалярных весов выбранных параметров блока для оптимизации функции потерь.

6. Последовательно построить композиции алгоритмов машинного обучения, когда каждый следующий алгоритм стремится компенсировать недостатки композиции всех предыдущих алгоритмов.

7. Оценить показатели надежности РЛС ДО и ее компонентов с учетом вида и критичности отказов компонентов РЛС ДО.

8. На основе полученных показателей произвести отбор элементов функционально-конструктивной матрицы для проведения технического обслуживания по состоянию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен вариант реализации модели расчета показателей надежности РЛС ДО, учитывающий особенности структуры РЛС ДО в виде функционально-конструктивной матрицы.

Данная модель получена путем агрегирования статических и динамических моделей для оценки надежности РЛС ДО крупноблочной структуры.

Предложенная модель учитывает различные виды отказов за счет использования априорной информации о РЛС ДО и информации о техническом состоянии по данным встроенного контроля, что позволяет получать не только мгновенные значения показателей надежности, но и интервальные, определяемые на бесконечности.

Использование агрегирования статических и динамических моделей для оценки надежности РЛС ДО крупноблочной структуры позволяет наиболее эффективно перейти от технического обслуживания по календарному принципу к техническому обслуживанию по состоянию.

Список используемых источников

1. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование / С.Ф. Боев, А.Ф. Автушенко, С.В. Алексеев и др. – М.: Радиотехника, 2013. – 168 с.

2. Боев С.Ф., Слока В.К., Рахманов А.А. Система модульно-параметрического проектирования радиолокационных станций дальнего обнаружения нового поколения ОАО «РТИ» // История отечественной радиолокации / под ред. С.В. Хохлова. – М.: Столичная энциклопедия, 2015. – С. 407–414.

3. Рахманов А.А. Основные принципы формирования предложений в государственную программу вооружения и федеральные целевые программы по РЛС дальнего обнаружения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 7–14.

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. Боев С.Ф., Рахманов А.А. Методологические основы управления созданием высокоинформативных унифицированных РЛС ракетно-космической обороны // Радиопромышленность. – 2016. – № 1. – С. 6–13.

6. Боев С.Ф., Логовский А.С. Управление процессами создания РЛС ДО функционально-блочной структуры // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 7. – С. 12.

7. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. – 2-е изд., испр. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 256 с.

8. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2007. – 20 с.
9. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 478 с.
10. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
11. Халимов А.Г., Зайнуллин Р.С., Халимов А.А. Техническая диагностика и оценка ресурса аппаратов: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 408 с.

А.А. Бурлаков,
кандидат воен. наук, доцент
Военная академия связи, г. Санкт-Петербург;
Г.П. Дорошенко,
кандидат техн. наук
Военная академия связи, г. Санкт-Петербург;
И.В. Левко,
кандидат техн. наук, доцент;
К.Е. Легков,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СНАБЖЕНИЯ ВОЙСК КОМПЛЕКТАМИ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИМУЩЕСТВА СВЯЗИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В условиях современных боевых действий основным источником восполнения боевых потерь вооружения, военной и специальной техники является система восстановления. Эффективность системы восстановления непосредственно зависит от наличия запасных частей, блоков, агрегатов, используемых при ремонте. В ходе боевых действий ремонт военной техники связи и автоматизированных систем управления осуществляется с использованием комплектов военно-технического имущества связи. Результаты анализа действующей системы снабжения войск военно-техническим имуществом связи и автоматизированных систем управления (АСУ) свидетельствуют о ее неполном соответствии предъявляемым требованиям. Созданные в настоящее время запасы военно-технического имущества связи частично обеспечивают ремонт техники связи старого парка, для современной техники связи запасы не создаются. Во многом существующие проблемы обусловлены несовершенством методик создания запасов. Предлагаемая методика позволяет в значительной мере избавиться от недостатков рассматриваемой системы, повысить эффективность ее функционирования, снизить затраты на содержание запасов военно-технического имущества связи. Использование данной методики позволяет создавать запасы минимально необходимого объема при соблюдении условия удовлетворения требований со стороны системы восстановления техники связи по своевременному обеспечению данной системы необходимым количеством запасных частей требуемой номенклатуры, результатом чего будет повышение эффективности функционирования системы восстановления техники связи и, в конечном счете, рост уровня укомплектованности войск работоспособной техникой связи и автоматизированных систем управления.

Ключевые слова: техника связи и автоматизированных систем управления; военно-техническое имущество связи, техническое обеспечение техники связи и автоматизированных систем управления; запасные части, инструмент и принадлежности; текущий ремонт; средний ремонт.

Поддержание боеспособности войск по наличию работоспособной техники связи и автоматизированных систем управления (ТС и АСУ) является основной задачей системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ). Основным источником восполнения потерь ТС и АСУ в ходе ведения боевых действий является восстановление образцов, получивших боевые повреждения. Учитывая высокую интенсивность ведения современных боевых действий, повреждения образцов средств связи будут носить массовый характер. В этих условиях на систему ТОС и АСУ возлагается задача восстановления значительного количества средств связи различных типов, модификаций и поколений. Справиться с этой задачей в требуемые сроки позволяет использование метода агрегатного ремонта. При этом снижаются требования к квалификации ремонтников, уменьшается время, затрачиваемое на восстановление, но при этом возникает необходимость заблаговременного создания запасов комплектов военно-технического имущества (ВТИ) связи для обеспечения восстановления техники связи и АСУ в военное время, их хранения в мирное время и своевременного освежения.

Результаты анализа существующей системы ТОС и АСУ свидетельствуют о том, что со-

зданные в настоящее время запасы ВТИ связи лишь частично удовлетворяют требованиям по восстановлению техники связи и АСУ старого парка, для восстановления современных образцов ТС и АСУ запасы не создаются по причинам экономического характера. При этом существующие запасы создавались без учета факторов, влияющих на процесс восстановления в войсковых ремонтных органах, что не позволяет эффективно использовать их возможности и ведет к росту экономических издержек, связанных с затратами на создание и содержание комплектов ВТИ (КВТИ). Освежение запасов не производится, что приводит к их моральному и физическому старению.

В состав комплектов ВТИ включаются групповые и ремонтные комплекты запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИП), выпускаемые промышленностью, электронные приборы, радиодетали, эксплуатационные расходные материалы (ЭРМ), средства измерений, инструмент и другое имущество, необходимое для ремонта техники связи и АСУ.

В соответствии с существующей методикой комплекты ВТИ в зависимости от установленных объемов и порядка эшелонирования подлежат разделению на части (т. е. те части, которые должны содержаться непосредственно в ремонтных подразделениях и на складах).

В основе существующей методики формирования комплектов ВТИ связи заложено прогнозируемое количество ремонтов техники связи и АСУ за определенное время ведения боевых действий. Комплекты ВТИ формируются из комплектов ЗИП-Г (групповых) и ЗИП-Р2 (ремонтных). Комплекты ЗИП-Г и ЗИП-Р2 созданы исходя из кратности (требуемого количества) обеспечиваемых соответственно текущих и средних ремонтов конкретных образцов техники связи и АСУ.

Потребность в войсковых запасах комплектов ВТИ рассчитывается для каждой группы однотипной техники связи с учетом следующих факторов:

- наличия однотипных средств связи в соединении (воинской части);
- продолжительности операции в сутках;
- количества ремонтов, которое обеспечивается одним комплектом ЗИП.

На первом этапе определяется количество однотипной ТС и АСУ, которая потребует текущего ремонта (ТР) $N_{трj}(t)$ и среднего ремонта (СР) $N_{срj}(t)$ за соответствующий период времени. На основании количества ТР $Z_{трj}$, которое обеспечивает один комплект ЗИП-Г и количества СР $Z_{срj}$, которое обеспечивает один комплект ЗИП-Р2 для соответствующих типов ТС и АСУ, определяется потребность в них для создания запасов ВТИ:

$$N_{ЗИП-Гj} = N_{трj}(t) / Z_{трj} - \text{количество комплектов ЗИП-Г в составе комплекта ВТИ};$$

$$N_{ЗИП-Рj} = N_{срj}(t) / Z_{срj} - \text{количество комплектов ЗИП-Р2 в составе комплекта ВТИ}.$$

Использование методики, в основу которой положена зависимость состава комплекта ВТИ от прогнозируемого количества ремонтов техники связи и АСУ за расчетный период, не позволяет осуществлять разбиение комплектов ВТИ по суткам ведения боевых действий. Учитывая укомплектованность соединений (воинских частей) техникой связи и АСУ широкой номенклатуры, это приводит к созданию избыточных запасов ВТИ связи. Существующая схема эшелонирования запасов комплектов ВТИ связи также предопределяет создание избыточных запасов ВТИ.

Производственные возможности ремонтных органов и органов снабжения при формировании комплектов ВТИ не учитываются. Запасы комплектов ВТИ для восстановления ТС и АСУ в ходе повседневной деятельности не используются. Результатом этого является рост расходов на создание и хранение комплектов ВТИ связи.

Следует отметить, что создание запасов ВТИ в формате номерных комплектов ВТИ, при котором состав формируемых комплектов ВТИ привязывается к виду формирования для частей и соединений связи мало приемлем, так как практически каждое формирование с точки зрения укомплектованности различными типами ТС и АСУ уникально. Вследствие этого комплект ВТИ для обеспечения ремонта ТС и АСУ для каждого формирования связи будет

иметь свое содержание. Из этого следует вывод, что объединение комплектов ЗИП, предназначенных для ремонта конкретных образцов ТС и АСУ в унифицированные комплекты ВТИ, является нецелесообразным. Однако данное требование является общим для всех видов и родов войск.

В процессе реализации требования эшелонирования всех видов запасов, в том числе ЗИП, существует устойчивая тенденция их приближения непосредственно к обеспечиваемым формированиям, вызванная рядом обстоятельств. Во-первых, возрастающей актуальностью и необходимостью автономного боевого применения подразделений и частей в составе специальных группировок войск в ходе вооруженных конфликтов. Во-вторых, внедрением в войска агрегатного метода ремонта с использованием не списываемых комплектов ЗИП, состоящих из радиоэлектронных узлов в виде электронных модулей (ЭМ) различных уровней разукрупнения.

Необходимое количество ЗИП (ЗИП-Г и ЗИП-Р2) для укомплектования запасов ВТИ соединений (воинских частей), как правило, составляет единицы комплектов для определенных групп ТС и АСУ. Очевидно, что разбиение и рассредоточение одного или нескольких комплектов ЗИП в составе комплектов ВТИ по всем уровням подсистемы материально-технического снабжения нецелесообразно.

Опыт работы органов снабжения и ремонта ТС и АСУ в боевых условиях показал, что наиболее рациональной является двухуровневая система эшелонирования запасов ВТИ, предназначенных для одной воинской части. Такая структура позволяет сконцентрировать запасы в заданном районе боевого применения частей и подразделений, повысить эффективность агрегатного ремонта и максимально сократить время восстановления поврежденной ТС и АСУ. Первым эшелонном является непосредственно соединение, воинская часть со своими органами снабжения, вторым – органы снабжения и ремонта объединений.

Определение требуемых объемов ЗИП должно осуществляться исходя из фактического количества ТС и АСУ, их характеристик надежности для условий повседневной деятельности и прогнозируемых результатов воздействия противника в условиях ведения боевых действий, принятых моделей эксплуатации, а также пространственно-временных характеристик системы ТОС и АСУ.

В системе снабжения войск комплектами ВТИ связи реализуется управляемый процесс обеспечения ремонта и технического обслуживания ТС и АСУ, основное содержание которого заключается в хранении и целенаправленном перемещении комплектов ВТИ по структурным элементам системы ТОС и АСУ. В связи с этим необходимо ввести понятие запаса элемента данного типа – m_i . Этот показатель будет определять и начальный уровень запаса i -го элемента.

Для оценки эффективности запасов ВТИ целесообразно использовать показатель K_{Γ}^3 – коэффициент готовности запасов, под которым принято понимать среднюю по времени вероятность того, что запасы находятся в безотказном состоянии, т. е. этот показатель определяет долю времени, в течение которого образец или группа образцов ТС и АСУ находится в работоспособном состоянии. При достаточности запасных частей или необходимых материалов в общем времени эксплуатации, K_{Γ}^3 будет иметь значение

$$K_{\Gamma}^3 = 1 - \frac{T_{\text{ВМ}}}{T_{\text{ВМ}} + T_{\text{ОМ}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{ВМ}}$ – средняя продолжительность одного отказа запасов на удовлетворение заявки на запасные части;

$T_{\text{ОМ}}$ – среднее время между отказами запасов.

Коэффициент готовности запасов в наибольшей степени пригоден для оценки эффективности системы непосредственно в соединениях и воинских частях. Для органов ТОС и АСУ (ремонта и снабжения) целесообразно в качестве показателя эффективности выбрать среднее

время задержки в удовлетворении заявки на элемент запаса Δt . Этот показатель представляет собой стационарное значение отношения

$$\Delta t = \lim \frac{T_3(\tau)}{\Lambda(\tau)}, \quad (2)$$

где $T_3(\tau)$ – суммарное время, на которое удовлетворение заявок, поступивших в подсистему за время τ , задержится по причине нехватки запасных агрегатов или материалов;
 $\Lambda(\tau)$ – общее количество заявок, поступивших в подсистему снабжения за время τ .

Оценка эффективности функционирования системы снабжения комплектами ВТИ связи может быть получена соотношением K_r^3 с затратами. При определении нормы накопления запасов ВТИ для обеспечения агрегатного ремонта затраты имеют, как правило, линейную зависимость от их объема. Стоимость запасов ВТИ для z -го типа ТС и АСУ составит

$$C_{z\text{зип}} = \sum_{i=1}^{I_z} c_i \cdot m_i, \quad (3)$$

где c_i – масса, объем или стоимость одной i -й единицы запаса;

m_i – количество элементов i -го типа в запасе;

I_z – количество типов элементов, входящих в состав запаса, обслуживающего ТС и АСУ z -го типа.

Для определения объемов оптимальных запасов необходимо производить направленный выбор с использованием методов дискретной оптимизации в системе снабжения комплектами ВТИ связи, отвечающих требованиям по ограничениям на K_r^3 или Δt .

Систему снабжения войск комплектами ВТИ связи можно представить в виде иерархической двухуровневой многономенклатурной системы.

Первый уровень комплектов ВТИ связи включает взаимосвязанные ЗИП-О (одиночный) образцов техники связи и АСУ и обслуживающие их ЗИП-Г соединений (воинских частей). При этом комплектуемые из составов ЗИП одной номенклатуры могут использоваться для восстановления любого однотипного образца техники связи и АСУ. Пополнение запасов комплектов ВТИ первого уровня в условиях повседневной деятельности предлагается осуществлять с периодичностью один раз в год путем поставки необходимого количества ЗИП-Г. Восстанавливаемые элементы из состава ЗИП первого уровня подлежат восстановлению в ремонтных органах с последующим возвратом в состав ЗИП, либо обмену их на исправные из состава ЗИП-Г и ЗИП-Р2 второго уровня. Возможна экстренная доставка комплектов ЗИП-Г.

Второй уровень комплектов ВТИ связи состоит из комплектов ЗИП-Г и ЗИП-Р2 базы ремонта средств связи (БРСС) и сервисных организаций. В условиях повседневной деятельности комплектуемые из состава ЗИП второго уровня могут использоваться в качестве обменного фонда для ЗИП первого уровня только при условии их полного израсходования (отказа ЗИП первого уровня). В условиях ведения боевых действий ЗИП из состава комплектов ВТИ второго уровня передаются в соединения (воинские части) по предназначению.

Такая схема снабжения позволяет разработать методику организации системы снабжения войск комплектами ВТИ связи, обеспечивающую создание и хранение рациональных объемов запасов ЗИП, достаточных для поддержания требуемого коэффициента готовности техники связи и АСУ.

Далее необходимо определить объем n_i – рационального запаса ЗИП в составе первого и второго эшелонов комплектов ВТИ.

1. Определение исходных данных и задание требований к системе обеспечения войск комплектами ВТИ связи.

Для формирования комплекта ВТИ первого эшелона:

- Z – количество типов ТС и АСУ в соединениях (воинских частях);
 N_i – количество образцов ТС и АСУ i -го типа в соединении (воинской части);
 n_i – количество комплектов ЗИП для образца ТС и АСУ i -го типа;
 T_{Hi} – среднее время наработки на отказ образца ТС и АСУ i -го типа, либо λ_i – интенсивность отказов образца ТС и АСУ i -го типа;
 T_{Gi} – годовая норма наработки образца ТС и АСУ i -го типа;
 $\tau_{1\text{эшелона}}$ – период операции, обеспечиваемый запасами ВТИ первого эшелона;
 $N^{\text{испр}}(\tau)$ – требуемый уровень обеспеченности соединений (воинских частей) работо-

способной (исправной) ТС и АСУ на заданное время $\tau = \tau_{1\text{эшелона}}$ для задания показателей достаточности запасов ВТИ связи первого эшелона;

- $p(\tau)$ – среднесуточная вероятность потерь, которая задается исходя из условий ведения операции.

Для формирования комплекта ВТИ второго эшелона дополнительно задаются:

N_{i0} – общее количество образцов ТС и АСУ i -го типа в объединении;

$\tau_{2\text{эшелона}}$ – период операции, обеспечиваемый запасами ВТИ второго эшелона.

2. Определение требуемых значений показателей эффективности.

С этой целью производится расчет параметра потока обращений в ЗИП-Г первого эшелона образца ТС и АСУ i -го типа. На основании полученного результата определяются требуемое значение Δt – среднее время задержки в удовлетворении заявки на комплект ЗИП-Г для запасов второго эшелона и требуемое значение K_{Γ}^3 – для запасов первого эшелона.

3. Определение α_i – среднего числа заявок, поступающих в комплект ЗИП за период T_i по выражению

$$\alpha_i = N_i T_i \lambda_i. \quad (4)$$

4. Вычисление расчетного показателя D :

– для запасов первого эшелона

$$D = -\ln K_{\Gamma}^{\text{TP}}; \quad (5)$$

– для запасов второго эшелона

$$D = \Delta t^{\text{TP}} \sum_{i=0}^{N_i} N_{i0} \lambda_i, \quad (6)$$

либо

$$D = \Delta t^{\text{CP}} \sum_{i=0}^{N_i} N_{i0} \lambda_i. \quad (7)$$

5. Определение путем итерационных вычислений рационального количества комплектов ЗИП-Г (P_2), т. е. такого минимального значения n_i , для которого промежуточный расчетный показатель $R(n_i, \alpha_i)$ удовлетворяет неравенству

$$R(n_i, \alpha_i) \leq D. \quad (8)$$

6. Результатом расчета будет являться минимально необходимое количество комплектов ЗИП-Г первого эшелона, ЗИП-Г и ЗИП-Р2 второго эшелона запасов ВТИ связи.

Полученные результаты позволяют создать методику формирования системы снабжения войск комплектами ВТИ связи.

Методика включает в себя следующие три этапа.

1. Определение исходных данных:

- количество групп ТС и АСУ соединения (воинской части) и количество соответствующих образцов в группе – N_i ;
- количество групп ТС и АСУ соединения (воинской части) и количество соответствующих образцов в группе, переданных на сервисное обслуживание – N_{iC} ;
- количество групп ТС и АСУ объединения и количество соответствующих образцов в группе – N_{iO} ;
- количество групп ТС и АСУ объединения и количество соответствующих образцов в группе, переданных на сервисное обслуживание – N_{iOC} ;
- $N^{\text{испр}}(\tau)$ – требуемый уровень обеспеченности работоспособной (исправной) ТС и АСУ на заданное время.

2. Определение минимально необходимого количества комплектов ЗИП в составе комплектов ВТИ связи первого и второго эшелонов сервисных организаций и объединения путем определения по формализованным таблицам, либо производством необходимых расчетов.

3. Полученное количество комплектов ЗИП, их массогабаритные характеристики будут являться основой для организации системы снабжения войск (количество и характеристики объектов хранения, подъемно-транспортных средств, обслуживающего персонала и т. п.)

Предлагаемая методика позволяет создавать минимально необходимые объемы запасов комплектов ВТИ связи при условии достижения требуемого уровня обеспеченности работоспособной (исправной) ТС и АСУ на заданное время.

Для оценки экономического эффекта от внедрения предлагаемой методики целесообразно определить затраты на создание системы снабжения войск комплектами ВТИ связи с помощью существующей и разработанной методик.

Экономический эффект от внедрения разработанной методики организации системы снабжения войск комплектами ВТИ связи определяется по выражению:

$$\Theta_z = \frac{C_{\Sigma}^{\text{пред}}}{C_{\Sigma}^{\text{сущ}}}, \quad (9)$$

где $C_{\Sigma}^{\text{пред}}$ – затраты системы ТОС и АСУ на создание системы снабжения войск комплектами ВТИ связи с использованием разработанной методики;

$C_{\Sigma}^{\text{сущ}}$ – затраты системы ТОС и АСУ на создание системы снабжения войск комплектами ВТИ связи с использованием существующей методики.

Затраты на создание комплектов ВТИ на данном этапе разработки выражаются в количестве ЗИП-Г и ЗИП-Р2 всех типов.

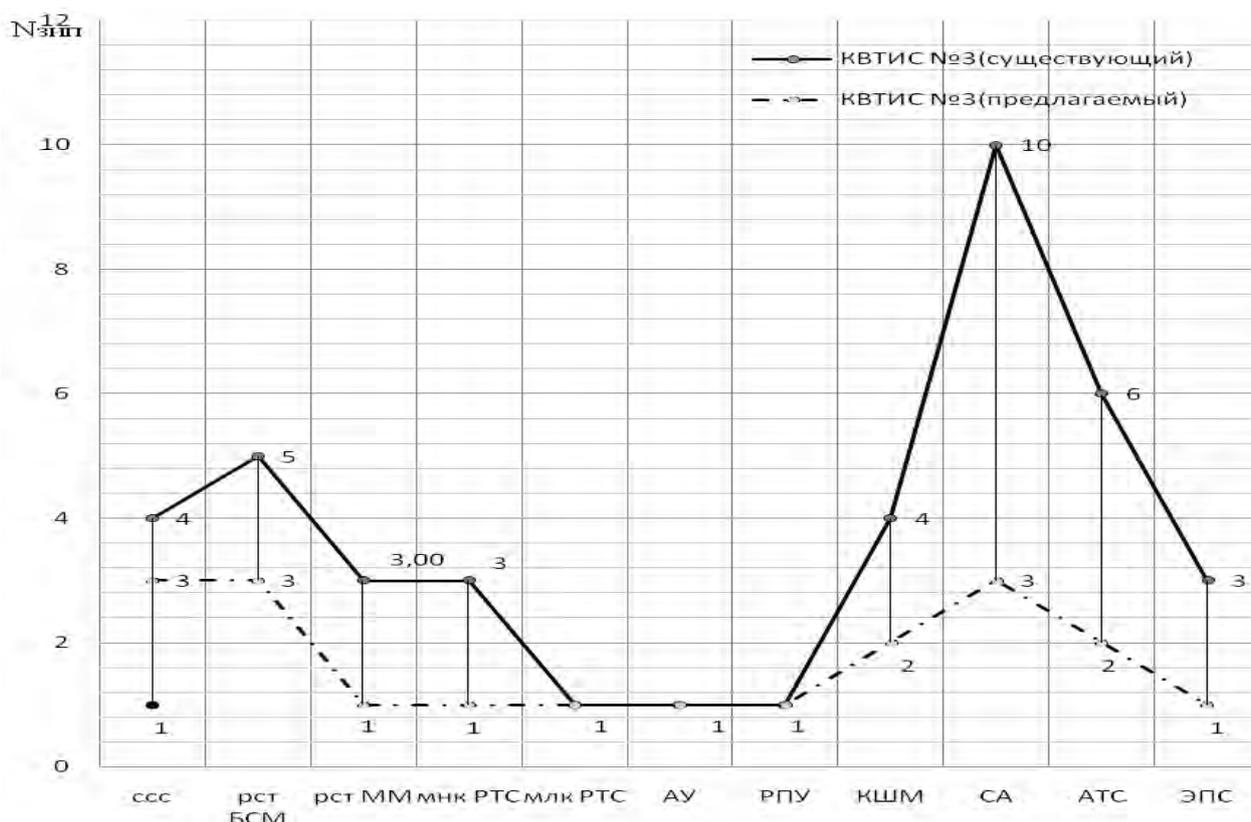
Исходя из этого

$$C_{z\Sigma} = M_z^{\text{ЗИП-Г}} + M_z^{\text{ЗИП-Р2}}. \quad (10)$$

Общая последовательность действий при определении экономического эффекта от внедрения разработанной методики организации системы снабжения войск комплектами ВТИ связи будет включать в себя:

- определение количества ЗИП-Г в составе первого эшелона запасов ВТИ связи;
- определение количества ЗИП-Г и ЗИП-Р2 в составе второго эшелона запасов ВТИ связи.

На рис. 1 показан достигаемый экономический эффект внедрения разработанной методики при формировании комплектов ВТИ связи.



*Рис. 1. Экономический эффект применения разработанной методики:
 ссс – станции спутниковой связи, рст БСМ – радиостанции большой и средней мощности, рст ММ – радиостанции малой мощности, мнк РТС – многоканальные радиостанции тропосферной связи, млк РТС – малоканальные радиостанции тропосферной связи, АУ – аппаратура уплотнения, РПУ – радиопередающие устройства, КШМ – командно-штабная машина, СА – средства автоматизации, АТС – автоматические телефонные станции, ВК – вычислительные комплексы, ЭПС – электропитающие станции*

Результаты проведенных исследований показывают, что организация системы снабжения войск комплектами ВТИ связи с применением предлагаемой методики позволит сократить материальные затраты на организацию системы снабжения войск комплектами ВТИ связи в 1,37–2,12 раза.

Список используемых источников

1. Система вооружения и военной техники / А.В. Чихачёв, С.В. Заяц, Г.П. Дорошенко, А.А. Бурлаков, Н.Е. Шашкина. – СПб.: ВАС им. С.М. Будённого, 2015. – 316 с.
2. Буренин А.Н., Легков К.Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления. – М.: Медиа-Паблишер, 2015.
3. Ануфриев А.А., Захаров А.А., Чихачёв А.В. Теоретические основы технического обеспечения связи и автоматизации. – СПб.: ВАС им. С.М. Будённого, 2011. – 238 с.
4. Бабкин А.В. Определение затрат на эксплуатацию техники и систем связи. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 148 с.
5. Оркин В.В., Легков К.Е., Буренин А.Н. Постановка задачи управления функционированием информационной системы // Вопросы оборонной техники: науч.-техн. ж-л. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 7–8. – С. 36–39.

6. *Плотников Ю.В., Чихачёв А.В.* Концептуальная модель восстановления средств связи оперативного объединения агрегатным методом ремонта // Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». – СПб., 2016. – С. 124–132.

7. *Легков К.Е., Емельянов А.В.* Подход к формализации описания структур подсистемы мониторинга автоматизированных систем управления инфокоммуникациями // Навигация и гидрография. – 2017. – № 48. – С. 27–34.

8. *Буренок В.М.* Теория и практика планирования и управления развитием вооружения: монография. – М., 2005. – 181 с.

9. *Горшков В.А., Молчанов В.А.* Научно-методическое и нормативное обеспечение организации эксплуатации, ремонта и хранения вооружения и военной техники // Военная мысль. – 2007. – № 8. – С. 145.

10. *Степшин М.Л.* Особенности технического обеспечения российских войск в локальных войнах и вооруженных конфликтах // Военная мысль. – 2008. – № 11. – С. 275–285.

В.И. Горбулин,
доктор техн. наук, профессор;
М.А. Ходор

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СЕГМЕНТА СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрены системы мониторинга воздушного пространства, основу которых составляют радиолокационные станции. Обозначена проблема отсутствия альтернативы в источниках информации для систем мониторинга воздушного пространства.

Рассмотрены радиоэлектронные помехи как основной негативный фактор, влияющий на процесс формирования поля наблюдения. Описана критериальная норма радиоэлектронного подавления радиолокационной станции преднамеренным помеховым сигналом.

Предложен путь решения выявленной проблемы за счет использования систем и средств, реализующих альтернативный способ локации. Проведен анализ современного состояния оптико-электронных средств обнаружения и автосопровождения объектов. Рассмотрены варианты определения пространственных координат объектов при обнаружении их оптико-электронными средствами.

Сформулирована задача покрытия участков подавления радиолокационного поля зонами обнаружения оптико-электронных средств. Проведен анализ известных подходов к формализованному описанию областей (фигур) произвольной конфигурации. Обоснована применимость к данной задаче способа представления геометрического объекта на основе построения его теоретико-множественного описания. Предложен способ решения задачи о покрытии участков подавления радиолокационного поля совокупностью равновеликих областей (кругов), центр каждого из которых размещен в своем узле структурной решетки. Проведена оценка вариантов локально-оптимальных решений поставленной задачи.

Ключевые слова: радиолокационное поле, радиоэлектронное подавление, оптико-электронное средство, описание области, R-функция, область Дирихле.

ВВЕДЕНИЕ

Зоной ответственности для систем мониторинга воздушного пространства и управления воздушным движением служит поле наблюдения, создаваемое применяемыми средствами наблюдения. В качестве базового средства наблюдения в настоящее время используются радиолокационные станции (РЛС), формирующие в заданной области ответственности радиолокационное поле. Помехи, воздействию которых подвергается РЛС, по своей природе разнообразны, и не всегда меры защиты способны компенсировать их воздействие. В результате происходит нарушение непрерывности поля наблюдения – образуются участки, не обеспеченные радиолокационным покрытием.

Для обеспечения целостности, т. е. повышения устойчивости поля наблюдения к помеховому воздействию, предлагается комплексное применение РЛС и оптико-электронных средств (ОЭС). Элементы оптико-электронного сегмента системы наблюдения не будут подвержены воздействию помех, действующих в радиодиапазоне, а значит, их применение позволит получить данные об обстановке на участке, где радиолокационное поле подавлено.

Одной из военно-технических задач, которые необходимо решить для эффективного комплексования средств наблюдения радиолокационного и оптико-электронного диапазонов, является распределение областей ответственности между элементами оптико-электронного сегмента. Исходными условиями для данной задачи будут размеры участка поля наблюдения, не обеспеченные радиолокационным покрытием вследствие воздействия радиопомех. Результатом решения данной задачи будет модель, определяющая потребный наряд ОЭС, а также тактико-технические требования к реализуемым ими зонам наблюдения.

ФОРМИРОВАНИЕ УЧАСТКА ПОДАВЛЕННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛЯ

Последствия воздействия помех ухудшают качество обрабатываемой информации в результате ее разрушения либо старения, что увеличивает степень неопределенности при принятии решений.

Нанесение информационного ущерба путем создания преднамеренных помех РЛС реализуется при выполнении энергетического условия ее подавления. Данное условие заключается в превышении отношения мощности помехи на входе приемника РЛС, определяемое в полосе пропускания его линейной части, к мощности полезного (отраженного) сигнала над коэффициентом подавления [1]. Последний определяется видом и параметрами помехового и полезного сигналов, а также реализованной в объекте подавления схемой их обработки.

В качестве показателя результативности радиоэлектронной защиты РЛС может использоваться защитное отношение, которое определяется как минимальное отношение мощности сигнала P_c к суммарной мощности помехи P_n и шумов $P_{ш}$ на входе приемного устройства РЛС, при котором обеспечивается требуемое качество функционирования РЛС [2]:

$$\gamma_3 = \left(\frac{P_c}{P_n + P_{ш}} \right)_{\min}. \quad (1)$$

Размер наносимого информационного ущерба определяется энергетическими показателями как средства подавления, так и средства наблюдения, а также расстоянием между ними. Количественно информационный ущерб, наносимый РЛС, выражается размерами зоны подавления, которая представляет собой некоторый участок в пределах зоны обнаружения подавляемой РЛС. На границах этого участка отношение мощностей полезного и помехового сигналов равно величине защитного отношения, внутри участка – меньше.

Считается, что зона подавления реализована в тех точках пространства, где выполняется условие подавления $\gamma_3 \geq P_c / (P_n + P_{ш})$.

Таким образом, используя данные о параметрах применяемых противником средствах радиоэлектронного подавления, на автоматизированных средствах поддержки принятия решения в оперативном порядке можно рассчитать и построить области ожидаемого подавления радиолокационного поля.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

В сложной помеховой обстановке, когда на естественный помеховый фон накладывается противодействие средств радиоэлектронного подавления, системы мониторинга воздушного пространства и управления воздушным движением требуют дополнительных мер по обеспечению данными о воздушной обстановке. Данная потребность особенно критична для задачи обнаружения средств воздушного нападения на малых и предельно малых высотах ввиду формирования областей радиотени на малых углах места от естественных (неровности рельефа, лес) и искусственных (здания, сооружения) препятствий распространению радиоволн.

Развертывание дополнительных РЛС обнаружения маловысотных летательных аппаратов в требуемых количествах – это мероприятие, требующее значительных денежных средств. Принятие мер по повышению высоты электрического центра антенны однозначно приводит к увеличению числа демаскирующих факторов и снижению оперативности оборудования позиций размещения радиолокационных станций.

Данная проблема может быть решена путем использования систем и средств, дающих наибольший удельный вклад в повышение эффективности информационного обеспечения на единицу суммарных затрат на всех этапах жизненного цикла этих систем и средств [3]. В настоящее время эту роль могут выполнять оптико-электронные средства (ОЭС) обнаружения и автосопровождения объектов.

К характерным особенностям современных тепловизоров относится то, что, как правило, они работают в диапазоне длин волн 8–14 мкм и имеют высокое пространственное разрешение, составляющее 0,33–2,5 миллирадиан (1,1–8,25 угловых минут) [4].

Одной из отечественных разработок инфракрасных средств обнаружения является оптико-электронная станция «Феникс» [5]. Она позволяет осуществлять круговой обзор пространства и обнаруживать самолеты на дальностях до 15 км.

Наибольшее развитие такие ОЭС получили в системах управления корабельным оружием, где решены вопросы обеспечения кругового пассивного обзора в инфракрасном спектре длин волн, автоматического обнаружения объектов, их автосопровождения без прекращения пассивной локации окружающего пространства. Погрешность стабилизации, которая на подобных ОЭС не превышает 1 угловой минуты, и качество современных оптических каналов позволяет в дневных и ночных условиях обнаруживать быстродвижущиеся наземные, надводные и воздушные цели на расстоянии до 20 км [6].

Определение пространственных координат сетью ОЭС может производиться с помощью лазерного дальномера, либо триангуляционным методом. Ввиду того, что применение лазерного дальномера является демаскирующим фактором из-за излучения энергии в пространство, для системы мониторинга воздушного пространства предпочтительным считается пассивный триангуляционный метод.

Триангуляционный метод основан на измерении угловых направлений на объект минимум в двух приемных пунктах, разнесенных на некоторое расстояние, называемое базой. При определении пространственных координат объекта достаточно точно измерить азимуты β_1 и β_2 в двух пунктах и угол места ε_1 в одном, либо, наоборот, углы места ε_1 и ε_2 в двух пунктах и азимут β_1 в одном. Местоположение источника излучения соответствует точке пересечения трех поверхностей положения. Дальность до объекта r рассчитывается по измеренным углам и известной базе, например, из соотношения [7]:

$$r = \frac{B}{\cos \varepsilon_1 \cdot (\cos \beta_1 - \sin \beta_1 \cdot \operatorname{ctg} \beta_2)}, \quad (2)$$

где B – расстояние между опорными пунктами.

Таким образом, совместно с РЛС целесообразно применять ОЭС, образующие оптико-электронный сегмент систем мониторинга воздушного пространства и управления воздушным движением. Это даст возможность получать данные о воздушной обстановке в сложной помеховой обстановке.

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СЕГМЕНТА

Рассмотрено состояние системы наблюдения, при котором поле наблюдения содержит в своей структуре участки (провалы), не имеющие радиолокационного покрытия в результате воздействия на РЛС помех. Для восстановления непрерывности поля наблюдения предложено ввести в состав системы наблюдения сегмент на базе ОЭС. Необходимо построить модель, описывающую покрытие провалов зонами обнаружения ОЭС.

Полоса контроля – сечение поля наблюдения вертикальной плоскостью, перпендикулярной главному направлению. Для расчета компенсации провалов следует математически описать полосу контроля. Основу решения данной задачи составляет математическая формализация описания фигуры произвольной конфигурации в двумерном пространстве.

В отечественной и зарубежной литературе известен ряд подходов к формализованному описанию областей (фигур) произвольной конфигурации [8, 9]. Наиболее часто упоминаются следующие: описание области совокупностью систем неравенств; суммирование углов поворота луча по вершинам многоугольной области; задание области в дискретном виде рецеп-

торным полем; подсчет числа пересечений контура области с лучом, выходящим из точки области или ее внешности; построение так называемого «скелета» области и покрытие ее максимальными кругами, в ней содержащимися; аппроксимация области сплайнами.

Недостаток таких способов заключается в том, что они представляют описание фигуры в виде вычислимой функции, т. е. функции, задаваемой алгоритмом вычисления.

Указанный недостаток отсутствует в алгебраическом подходе. Он позволяет строить модели в аналитической форме, т. е. в виде формул, учитывающих как геометрическую, так и физическую информацию, и в то же время дает возможность на аналитическом уровне осуществлять управление вычислительным процессом необходимой переработки информации. Такой подход базируется на использовании алгебрологических методов теории R-функций [8]. В теории и практических приложениях R-функций первостепенное значение имеет следующее свойство: являясь обычными функциями непрерывных аргументов, которые изучаются в классическом математическом анализе, эти функции обладают рядом свойств функций дискретных аргументов (функций алгебры логики). Это обстоятельство позволяет при использовании R-функций применять одновременно методы классического непрерывного анализа и методы дискретного анализа. Одним из эффективных приложений теории R-функций является решение задачи аналитического описания сложных геометрических объектов.

В методах теории R-функций построению аналитических описаний геометрических объектов предшествует построение теоретико-множественного описания его в виде объединения и пересечения простых (исходных) геометрических объектов. Построение аналитического описания геометрического объекта выполняется путем формальной процедуры, если осуществлено его теоретико-множественное описание.

Пусть даны простые (опорные) области:

$\Sigma_1 = (a^2 - x^2 \geq 0)$ – вертикальная полоса между прямыми $x = \pm a$;

$\Sigma_2 = (b^2 - y^2 \geq 0)$ – горизонтальная полоса между прямыми $y = \pm b$;

$\Sigma_3 = (c^2 - x^2 \geq 0)$ – вертикальная полоса между прямыми $x = \pm c$;

$\Sigma_4 = (a^2 - x^2 \geq 0)$ – горизонтальная полоса между прямыми $y = \pm d$.

Фигура будет определена логической формулой $\Omega = (\Sigma_1 \wedge \Sigma_2) \wedge (\Sigma_3 \vee \Sigma_4)$.

В графическом виде фигура представлена на рис. 1.

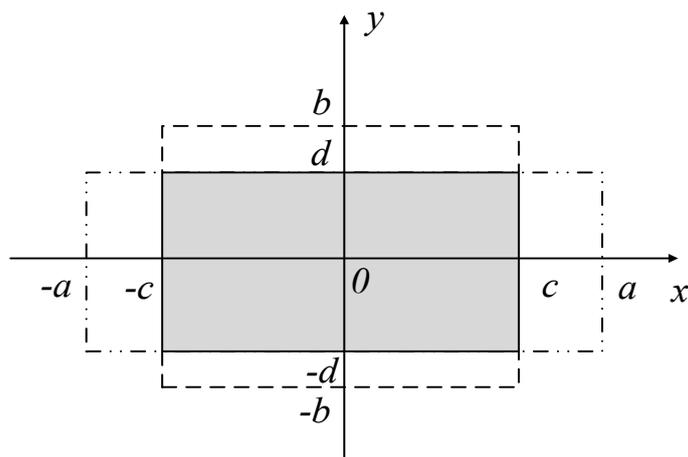


Рис. 1. Геометрический объект

Провал в поле наблюдения определяется пересечением двух фигур, заданных пределами полосы контроля и условием подавления РЛС. В общем случае провал представляет собой прямоугольник, ограниченный на рис. 1 сплошными линиями и выделенный заливкой.

Для распределения зон ответственности в пределах провала необходимо определить структурную организацию рассматриваемого пространства. Расположим на плоскости два семейства параллельных прямых, разбивающих плоскость на равные параллелограммы.

Множество L всех точек пересечения этих прямых (или множество вершин всех параллелограммов) называется точечной решеткой или просто решеткой, а сами точки – узлами решетки. Любой из этих параллелограммов называется фундаментальным параллелограммом или параллелограммом, порождающим решетку [10].

Задачу о редчайшем покрытии плоскости кругами можно сформулировать следующим образом: необходимо расположить в заданной области большое число точек так, чтобы каждая точка области лежала возможно ближе к какой-то из заданных точек, т.е. чтобы наибольшее расстояние от точки области до самой близкой к ней из заданных точек было возможно меньшим [11].

Использование совокупности областей Дирихле [10] получило широкое распространение при решении различных прикладных задач. Суть данного способа состоит в том, что анализируемая область (множество) разбивается на несколько непересекающихся подмножеств, называемых областями Дирихле, каждая из которых имеет свой центр (узел решетки).

Область Дирихле представляет собой совокупность точек исходного множества таких, что расстояние от них до центра этой области меньше расстояния до центра любой другой (соседней) области Дирихле. Из этого определения следует, что для математического описания анализируемой области произвольной конфигурации (множества) необходимо определить количество и положения центров, а также границы областей Дирихле. Размер каждой области характеризуют радиусом – расстоянием от центра до наиболее удаленной точки области Дирихле. Наибольший из радиусов областей Дирихле, формирующих исходное множество, определяет методическую погрешность формализованного описания этого множества заданным количеством областей Дирихле. Поэтому при формировании областей Дирихле необходимо искать такое разбиение множества на подмножества, чтобы радиус наибольшей области был как можно меньше, т.е. чтобы методическая погрешность была бы минимальна.

Возникающая минимаксная оптимизационная задача (иначе – задача на «узкие места») относится к разделу математики, получившему название комбинаторной геометрии. Следует отметить, что задачи данного класса являются трудно решаемыми [11]. Если исходная анализируемая область является плоской фигурой достаточно большой площади, то возможны три варианта размещения центров областей Дирихле (локально-оптимальных решений):

1. Центры областей располагаются в вершинах прилежащих друг к другу правильных треугольников (рис. 2).
2. Центры областей располагаются в вершинах прилежащих друг к другу квадратов (рис. 3).
3. Центры областей располагаются в вершинах прилежащих друг к другу правильных шестиугольников, повторяющих строение сот (рис. 4)

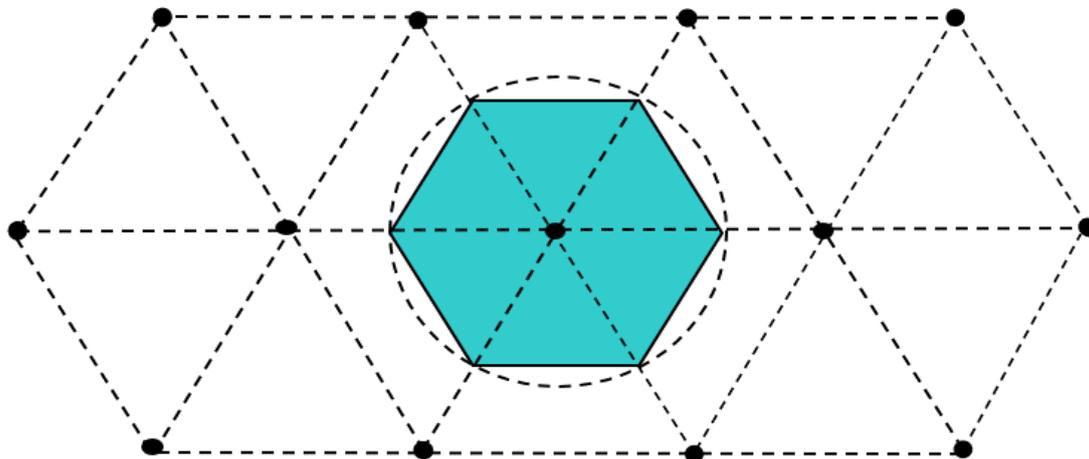


Рис. 2. Центры областей Дирихле, расположенные в вершинах прилежащих друг к другу правильных треугольников

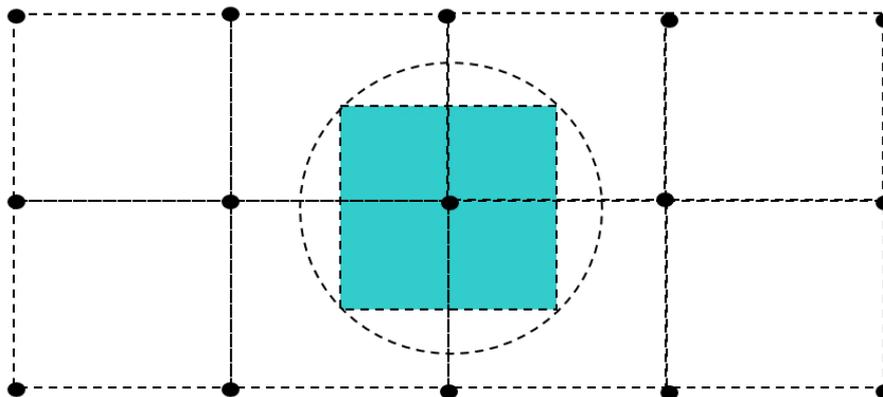


Рис. 3. Центры областей Дирихле, расположенные в вершинах прилежащих друг к другу квадратов

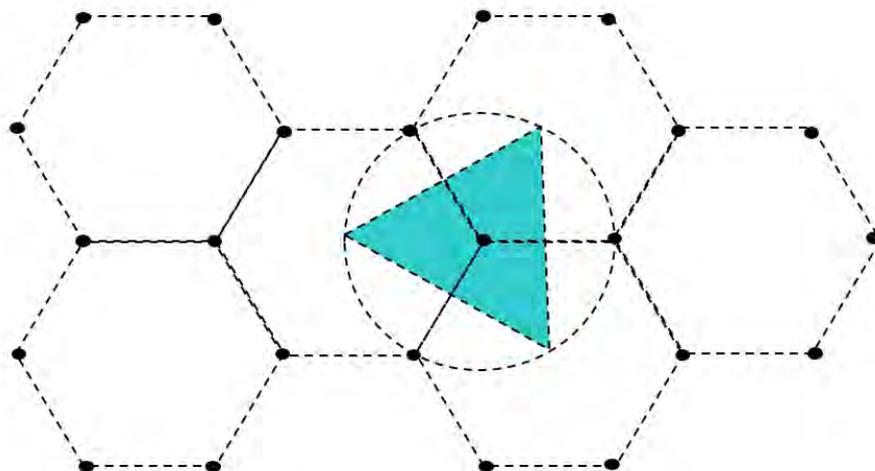


Рис. 4. Центры областей Дирихле, расположенные в вершинах прилежащих друг к другу правильных шестиугольников

Из рисунков видно, что любое отклонение одного из центров от номинального положения приведет к ухудшению значения целевой функции, т. е. к увеличению радиуса по крайней мере одной из областей Дирихле. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что каждый из представленных вариантов является локально-оптимальным решением рассматриваемой задачи. Этот пример решения задачи комбинаторной геометрии наглядно иллюстрирует свойство многоэкстремальности целевой функции в задачах такого сорта.

На рис. 2–4 обозначено:

- жирными точками – центры кругов располагаются в вершинах перечисленных правильных многоугольников;
- пунктирными окружностями – очертания некоторых кругов, которыми покрывается фигура;
- затененными многоугольниками – области Дирихле одного из покрывающих кругов, т. е. множества точек этого круга, отстоящих от его центра не далее, чем от центров остальных кругов.

В первом случае областью Дирихле является правильный шестиугольник, во втором – квадрат и в третьем – правильный треугольник.

Отношение площади этой области $S_{\text{Дирихле}}$ к площади всего круга $S_{\text{Круга}}$ характеризует качество того или иного варианта решения, т. е. является своеобразным коэффициентом полезного действия (η). Этот показатель предпочтения является основным при выборе лучшего варианта расположения центров покрывающих кругов из всего множества альтернатив. В табл. 1 представлены основные характеристики указанных вариантов решения задачи (r – радиус круга).

Таблица 1

Результаты моделирования вариантов распределения областей ответственности

Фундаментальный параллелепипед решетки	$S_{\text{Дирихле}}$	$\eta = \frac{S_{\text{Дирихле}}}{S_{\text{круга}}} \cdot 100\%$	$\frac{\eta}{\eta_{\text{min}}} \cdot 100\%$
Треугольник	$(r^2 \cdot 3 \cdot \sqrt{3})/2$	82.7	150
Квадрат	$2 r^2$	63.7	115.6
Шестиугольник	$(r^2 \cdot 2 \cdot \sqrt{3})/3$	55.1	100

Из табл. 1 следует, что предпочтительнее всего в задаче покрытия центры кругов, обозначающие зоны ответственности ОЭС, располагать в вершинах правильных треугольников.

АЛГОРИТМ ДВУКРАТНОГО ПОКРЫТИЯ УЧАСТКА ДЕФОРМИРОВАННОГО РЛП ПОЛЯМИ ЗРЕНИЯ ОЭС

Участок деформированного РЛП формально может быть задан прямоугольником Q , характеризующимся параметрами:

- H_{min} – высотой нижней границы РЛП;
- H_{max} – высотой верхней границы РЛП;
- L – протяженностью по фронту.

Зона наблюдения формально задана областью G и определяется совокупностью из m полей зрения g ОЭС, которые при равенстве горизонтального и вертикального углов зрения представляют собой круги, описываемые радиусом R .

Пространственное покрытие зоной наблюдения зоны ответственности выполняется в том случае, если любая точка q участка деформированного РЛП лежит в пределах G .

Для определения структуры размещения полей зрения ОЭС целесообразно использовать аппарат областей Дирихле.

Все возможные варианты расположения полей зрения ОЭС определяются допустимым размещением их центров $t_i, i = 1, \dots, m$, в пределах G и описываются множеством точек пространства $t \in T_{\text{доп}}, T_{\text{доп}} \equiv G$. Качество распределения полей g в пределах Q описывается величиной ρ удаления произвольной точки $c \in G$, от центра t_i .

Центры областей g_i описываются векторами $t_i = [x_i; y_i]^T$ и располагаются в узлах решетки, описываемой матрицей $T = [t_1, \dots, t_m]^T$, причем $t_i \in Q, i = 1, \dots, m$, а $t \in T_{\text{доп}}$.

Рассмотрим вариант решетки, фундаментальным многоугольником которой является квадрат (рис. 5).

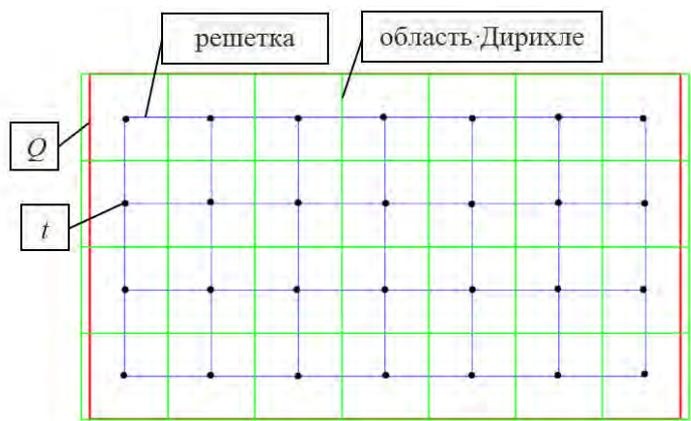


Рис. 5. Структура решетки (фундаментальный параллелограмм – квадрат)

Из рис. 5 видно, что совокупность m областей Дирихле представляет собой k слоев, содержащих по n квадратов в каждом, причем $m = k \cdot n$. Для определения радиуса окружностей, описанных вокруг каждого из квадратов, необходимо найти сторону квадрата a . Используя параметры зоны ответственности и количество полей зрения находим:

$$a = \max(H/k; L/n). \quad (3)$$

Радиус описанной вокруг квадрата окружности, обеспечивающий двукратное покрытие, высчитывается по формуле

$$R = 2 \cdot a / \sqrt{2}. \quad (4)$$

Структура полученной решетки определяется как

$$T_{\text{доп кв}}^* = \{T \in Q | x = x_1 + a \cdot (n-1), y = y_1 + a \cdot (k-1)\}. \quad (5)$$

Аппроксимируя области Дирихле описанными вокруг каждого из квадратов окружностями g с радиусом R , получаем искомую область G , содержащую в себе все точки области Q (рис. 6).

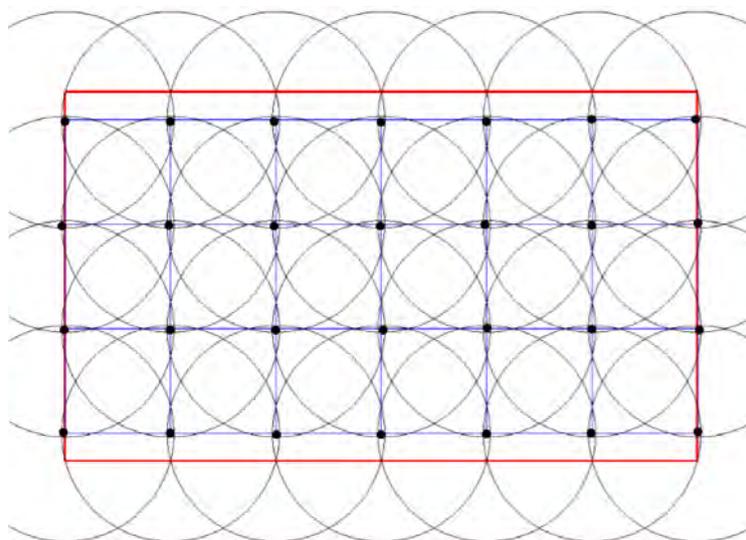


Рис. 6. Двукратное покрытие участка деформированного РЛП полями зрения ОЭС при фундаментальном многоугольнике решетки – квадрате

Получено математическое описание области G , обеспечивающей двукратное покрытие участка деформированного РЛП, т.е. определен такой вариант решетки T^* , при котором уменьшение количества g_i на единицу не приводит к нарушению требования, что любая точка q участка деформированного РЛП принадлежит хотя бы одному g_i .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод о том, что решение задачи своевременного обнаружения радиолокационными станциями средств воздушного нападения, действующих на малых и предельно малых высотах в условиях радиоэлектронного подавления, осуществляется со значительным снижением дальности обнаружения. Предложенное комплексное применение радиолокационных и оптико-электронных средств позволяет компенсировать последствия негативного воздействия средств радиоэлектронного подавления. Проведенный анализ математического описания областей произвольной конфигурации показал преимущества использования аппарата R-функций, описывающих с некоторой точностью границы набором логических соотношений. Исследование вариантов структурной организации совокупности областей Дирихле для редчайшего покрытия фигуры произвольной конфигурации выявило превосходство фундаментального параллелограмма в форме правильного треугольника.

Список используемых источников

1. *Вакин С.А., Шустов Л.Н.* Основы радиоэлектронной борьбы. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998. – 436 с.
2. *Паршуткин А.В.* Радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств: учеб. пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. – 211 с.
3. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
4. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 452 с.
5. Оптико-электронная станция кругового обзора (ОЭСКО) «Феникс» // Сайт российской военной техники. – URL: http://www.rusarmy.com/pvo/pvo_vsk/rls_fenix.html (дата обращения: 12.10.2017).
6. *Московченко Л.В., Тупиков В.А., Лысенко Э.Л.* Концепция построения перспективных систем оптико-электронной пассивной локации для надводных кораблей // Национальная оборона. – 2018. – №7. – URL: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/defense/2012/1009/13489430/detail.shtml> (дата обращения: 12.08.2018).
7. *Ширман Я.Д.* Теоретические основы радиолокации. – М.: Советское радио, 1970. – 243 с.
8. *Рвачев В.Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наук. думка, 1982. – 551 с.
9. *Гилой В.* Интерактивная машинная графика: структуры данных, алгоритмы, языки. – М.: Мир, 1981. – 384 с.
10. *Вавилов В.В., Устинов А.В.* Многоугольники на решетках. – М.: МЦНМО, 2006. – 72 с.
11. *Тот Л.Ф.* Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве / пер. с нем. Н.М. Макаровой. – М.: Физматгиз, 1958. – 364 с.

К.Г. Колесников,
кандидат техн. наук, доцент;
А.А. Масалкин,
кандидат техн. наук;
Б.В. Москвин,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Е. Шульгин

КООРДИНАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ КЛАСТЕРА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается задача планирования целевого применения кластера малых космических аппаратов (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе использования методов координации. Показателем оценки эффективности плана является полнота объема информации, предоставляемой потребителям. Допустимость полученного плана определяется, исходя из ограничений, накладываемых на процесс целевого применения КА ДЗЗ. Для решения задачи планирования применения КА ДЗЗ используется алгоритм Данцига – Вульфа, в котором результирующий план применения кластера строится за счет координации частных планов применения отдельных КА мониторинга земной поверхности. При планировании учитываются основные ресурсные, временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процесс функционирования КА ДЗЗ.

Обосновываются преимущества координационного подхода к управлению группировки КА ДЗЗ. Проводится анализ состава конфликтных ситуаций, разрешающихся в процессе координационного планирования. Описывается разработанная методика координационного планирования целевого применения группировки космических аппаратов.

Ключевые слова: координационное планирование, космический аппарат, мониторинг земной поверхности, целевое применение, планирование применения, алгоритм Данцига – Вульфа.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из перспективных тенденций в области мониторинга земной поверхности является создание кластеров малых космических аппаратов (КМКА), включающих в свой состав группировку разнородных малых космических аппаратов (МКА) большой размерности и широкую сеть территориально распределенных центров приема, обработки и доведения до потребителей конечной продукции ДЗЗ [1]. Данная тенденция вытекает из существенного повышения требований потребителей к информационной эффективности мониторинга и продиктована:

– стремлением резкого расширения признакового пространства добываемых данных за счет интеграции разнородных КА, каждый из которых оснащается определенным типом сенсора;

– необходимостью обслуживания территориально разветвленной структуры многочисленных абонентов, заинтересованных в использовании информации космического мониторинга в масштабе времени, близком к реальному;

– снижением временных затрат на доведение данных зондирования Земли и продукции на их основе до конечных потребителей;

– повышением достоверности определения текущего состояния стационарных и подвижных объектов зондирования Земли, в том числе в сложных метеоусловиях и помеховой обстановке.

Увеличение размерности КМКА приводит к появлению альтернативных возможностей съемки одних и тех же районов наблюдения различными МКА, которые могут быть использованы для повышения информационной эффективности информации дистанционного зон-

дирования земной поверхности (ДЗЗ). В то же время, с ростом размерности кластера, одновременно возрастает и потенциальная возможность возникновения «конфликтных ситуаций», связанных с назначением различных МКА на съемку одного и того же объекта.

Процесс развития систем дистанционного зондирования сопровождается расширением рынка космических услуг, привлечением новых клиентов (организаций, ведомств, а в перспективе и частных лиц) и, как следствие, повышением требований к эффективности функционирования системы. В этих условиях появляется необходимость в проведении процедуры координации (согласования) расписания планов целевого применения МКА.

Большинство существующих разработок в области создания наземных и бортовых комплексов планирования целевого функционирования МКА ДЗЗ ориентированы на одиночные КА и не могут быть спроецированы на группировки большой размерности [2]. Для решения этой задачи предлагаются различные подходы. В работе [3] решалась задача синтеза оптимальной программы работы бортовой специальной аппаратуры КА ДЗЗ, решающая задачу оперативного наблюдения. В качестве оценки выходного эффекта оценивалось значение вероятности (она должна быть максимальна) того, что количество, качество и оперативная пригодность полученной информации удовлетворяет предъявленным требованиям. В работе [4] в качестве показателя качества функционирования космического аппарата наблюдения, при обслуживании ими групповых целей на ограниченном временном интервале использовалась производительность, определяемая как количество целей, обслуживаемых на одном эквивалентном участке функционирования. Задача решалась методом случайного направленного поиска с отсечением неперспективных вариантов (которые определялись как количество оставшихся целей). В работе [5] используется метод «поиска перспективных объектов». В основе этого метода лежит идея метода динамического программирования, когда проведение сравнения маршрутов проводится на каждом шаге построения маршрута, но принцип оптимальности здесь не используется. Оптимальное решение достигается за счет введение доминирующих условий одних вариантов над другими. Задача определения маршрута обхода целей, т. е. определения совокупности элементов групповой цели решалась в работе [6]. Оптимальным признавался маршрут обхода целей, при реализации которого достигается максимум производительности. Для решения данной задачи формируются матрицы временных ресурсов на маневр перенацеливания и относительных углов визирования целей. На основе этих матриц производится генерация матрицы достижимости целей.

Общим недостатком этих методов является использование при планировании фиксированного момента начала наблюдения объекта и, как следствие, априорный расчет матрицы, из-за чего уменьшается множество альтернатив. В результате синтезируемое расписание может оказаться неоптимальным. Поэтому возникает необходимость в совершенствовании методов оптимизации расписания наблюдения объектов МКА ДЗЗ. В [7] предложен метод оптимизации расписания сеансов наблюдения объектов для решения задачи с нефиксированным (подвижным в пределах допустимого интервала) моментом начала съемки объекта. Оптимизация расписания осуществляется на основе модифицированного метода ветвей и границ. В классическом методе ветвей и границ проводится сравнение текущей оценки значения целевой функции с уже вычисленной нижней границей (оценкой), на основе результата этого сравнения принимается решение об отсечении неперспективной ветви. В предложенном модернизированном методе данное правило имеет более общий вид, так как учитывается не только значение суммы целевой функции в виде суммы приоритетов целей полученного фрагмента расписания, но и время его завершения. Данный подход позволит существенно расширить множество альтернатив поиска оптимального плана и как следствие увеличит целевую функцию.

В настоящей работе рассматривается возможность реализации согласования планов применения КА ДЗЗ при решении целевых задач с помощью координационных методов, положительно зарекомендовавших себя при решении классических задач планирования и распределения ресурсов [8, 9].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задано множество МКА $A = \{a_i, i = \overline{1, n}\}$ и объектов наблюдения $C = \{C_q, q = \overline{1, k}\}$. В результате математического моделирования движения и функционирования КМКА могут быть сформированы следующие данные: расписание прохождения каждого МКА над объектами наблюдения (с учетом условий, необходимых для работы оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ) и количество витков, совершаемых i -м КА на интервале планирования – S_i . Тогда план целевого применения КМКА можно представить в виде совокупности булевых переменных $x_{ijs} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, s = \overline{1, S_i}$, которые принимают значение $x_{ijs} = 1$, если запланировано наблюдение j -го объекта i -м КА на s -м витке; $x_{ijs} = 0$ – в противном случае.

При планировании целевого применения МКА необходимо учитывать технические характеристики бортовой аппаратуры КА и возможность проведения совместной съемки различных объектов наблюдения. Формально множество допустимых планов применения i -го КА можно описать совокупностью линейных алгебраических неравенств [10]:

– ресурсные ограничения (ограничения на объем бортового запоминающего устройства, энергоемкость операций наблюдения и др.) в общем виде можно представить как

$$\sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^{S_i} (r_{ijs}^q x_{ijs}) \leq b^q, i = \overline{1, n}, q \in Q, \quad (1)$$

где r_{ijs}^q – ресурсоемкость проведения операции наблюдения x_{ijs} в единицах измерения q -го ресурса;

Q – множество ресурсов МКА, задействованных при выполнении операции наблюдения наземных объектов (объем бортового запоминающего устройства, электроэнергия и др.);

b^q – количество q -го типа ресурса;

– ограничения на совместность проведения операций наблюдения j -го наземного объекта различными МКА определяются выражением

$$\sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^{S_i} (x_{ijs}) \leq 1, j = \overline{1, m}; \quad (2)$$

– возможность наблюдения двух объектов на одном витке одним МКА – выражением

$$\frac{|\varphi_\alpha - \varphi_\beta|}{|t_\alpha - t_\beta|} \leq \omega. \quad (3)$$

Действительно, предположим, что по результатам прогнозирования МКА возможно наблюдение объекта α в момент времени t_α , для чего он должен быть повернут на угол φ_α , и объекта β в момент времени t_β под углом φ_β . Тогда возможность совместного (поочередного) наблюдения объектов α и β определяется угловой мерой $|\varphi_\alpha - \varphi_\beta|$, т. е. величиной угла, на которую должен совершить поворот своей визирной оси за время $|t_\alpha - t_\beta|$, необходимое на осуществление данного действия, при условии, что угловая скорость изменения положения визирной оси не превышает величину ω . Если данное требование не выполняется, то можно говорить, что операции наблюдения объектов – α и β . Соответствующие ограничения в формализованном виде можно представить как

$$x_\alpha + x_\beta \leq 1. \quad (4)$$

Для таких наборов $\alpha \equiv \langle i, j_\alpha, s_\alpha \rangle$ и $\beta \equiv \langle i, j_\beta, s_\beta \rangle$ и не выполняется условие (3).

В качестве показателя оптимальности применения КМКА можно выбрать показатель, характеризующий количество наземных объектов, информация о которых была получена в результате применения КМКА:

$$V = \sum_{s=1}^{S_j} \psi_j \sum_{j=1}^m (x_{ijs}), \quad (5)$$

где ψ_j – относительная важность j -го объекта.

Для удобства дальнейшей формализации опишем план применения i -го МКА в виде булевого вектора:

$$\mathbf{x}_i = (x_{i11}, x_{i12}, \dots, x_{ijs}, \dots, x_{imS_i}), x_{ijs} \in \{0, 1\}, j = \overline{1, m}, S = \overline{1, S_i}. \quad (6)$$

Тогда формально множество допустимых планов применения i -го МКА – Δ_i , задаваемых ограничениями (1) и (4), можно представить как

$$\Delta_i : A_i \mathbf{x}_i \leq b_i, i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Здесь A_i – матрица ограничений, накладываемых на процесс целевого функционирования i -го МКА;

b_i – вектор ограничений (количества ресурсов).

Тогда задачу планирования применения i -го КА можно представить в следующем виде

$$\mathbf{x}_i = \arg \max_{x_i \in \Delta_i} \{V_i(x_i)\}. \quad (8)$$

Задачи (8) являются задачами дискретного (булевого) математического программирования и могут решаться с использованием соответствующих методов, рассмотренных в [11, 12].

Анализ планов целевого применения КА ДЗЗ, получаемых в ходе решения задач (8) позволяет заключить, что в ходе «раздельного» планирования возможно возникновение «конфликтов», выражающихся в назначении нескольких КА для просмотра одного и того же объекта, что приводит к нецелесообразному расходованию ресурса бортовых систем КА. Разрешение таких ситуаций возможно за счет учета ограничений (2) или

$$\sum_{i=1}^n (A_{0i} x_i) \leq e, \quad (9)$$

где e – вектор-столбец, все компоненты которого равны единице.

Тогда задачу координационного планирования для всего КМКА с учетом разрешения конфликтов можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^n V_i(x_i) \rightarrow \max; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n A_{0i} x_i \leq e; \quad (11)$$

$$A_i x_i \leq b_i, i = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Здесь A_{0i} – матрица конфликтов для i -го КА. Совокупность данных матриц образуют связующую матрицу $A_0 = \|A_{01} \ A_{02} \ \dots \ A_{0n}\|$.

Тогда, имея в виду, что качество планирования системы в целом определяется качеством совместных действий подсистем, задача планирования целевого применения в целом может быть представлена в виде

$$x^* = \arg \max_{\substack{x_i \in \Delta_i \\ i = \overline{1, n}}} \left\{ \sum_{i=1}^n V_i(x_i) \mid \sum_{i=1}^n A_{0i} x_i \leq e, x_i \in \Delta_i, i = \overline{1, n} \right\}. \quad (13)$$

Результаты анализа структуры матрицы ограничений задачи (13) (рис. 1) показывают, что целесообразно провести декомпозицию данной задачи на частные задачи планирования за действия отдельных МКА и задачу координации планов (координирующую задачу).

$$\begin{array}{cccccc|cccc} A_{01} & A_{02} & \dots & A_{0i} & \dots & A_{0n} & x_1 & & e \\ \hline A_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & x_2 & & b_1 \\ & & & & & & \vdots & & b_2 \\ & & & & & & x_i & & \vdots \\ & & & & & & \vdots & & b_i \\ & & & & & & x_n & & \vdots \\ & & & & & & & & b_n \end{array} \leq$$

Рис. 1. Структура матрицы ограничений задачи планирования применения КМКА

Проведение декомпозиции предполагает поиск локальных оптимумов частных задач на блоках A_1, A_2 и т. д. (задачи вида (8)) с последующей координацией полученных решений на блоке A_0 . Решение задач поиска локальных оптимумов представляется известным. Остановимся подробнее на алгоритме решения координационной задачи.

Обозначим $|\Delta_i| = K_i, i = \overline{1, n}$ и сопоставим каждому q -му варианту допустимого плана булеву переменную δ_{iq} . Тогда задачи (10)–(12) можно переписать в виде:

$$\sum_{i=1}^n V_{iq} \delta_{iq} \rightarrow \max; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^{K_i} \alpha_{iq} \delta_{iq} \leq e; \quad (15)$$

$$\sum_{q=1}^{K_i} \delta_{iq} = 1, i = \overline{1, n}; \quad (16)$$

$$\delta_{iq} \in [0, 1], i = \overline{1, n}, q = \overline{1, K_i}. \quad (17)$$

Здесь: $V_{iq} = V_i(x_{iq}); \alpha_{iq} = A_i x_{iq}$.

Поскольку все допустимые решения задачи (14)–(17) являются крайними точками многогранника $\Delta = \bigcap_{i=1}^n (\Delta_i), \forall (iq): \delta_{iq} \geq 0$, то для них справедливы соотношения двойственности задачи математического программирования. Тогда критерием оптимальности некоторого решения $\delta = \|\delta_{iq}\|, i = \overline{1, n}, q = \overline{1, K_i}$ является условие [3]

$$\min_{i,q} [(\pi, \alpha_{iq}) - V_{iq} + \pi_i] \geq 0, \quad (18)$$

где (π, α_{iq}) – скалярное произведение векторов π и α_{iq} ;

π – вектор двойственных оценок условий задачи (14)–(15);

π_i – двойственная оценка i -го условия (16).

Двойственные переменные π и π_i можно интерпретировать как стоимость (ценность) использования ресурсов КМКА в единицах показателя V . При этом двойственные оценки π являются решением задачи $\pi^* = \arg \min_{A^T \pi \geq \psi} (b\pi)$ двойственной задаче (8). Оценки π_i получаются в ходе решения координационной задачи.

Выражение (18) можно преобразовать:

$$\begin{aligned} \min_{i,q} [(\pi, \alpha_{iq}) - V_{iq} + \pi_i] &= \min_i \left\{ \min_q [(\pi, \alpha_{iq}) - V_{iq} + \pi_i] \right\} = \\ \min_i \left\{ \pi_i + \min_q [(\pi, \alpha_{iq}) - V_{iq}] \right\} &= \min_i \left\{ \pi_i - \max_q [V_{iq} - (\pi, \alpha_{iq})] \right\} = \\ &= \min_i \left\{ \pi_i - \max_{x_i \in \Delta_i} [V_i(x_i) - (\pi, A_{oi}x_i)] \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь выражение $\max_{x_i \in \Delta_i} [V_i(x_i) - (\pi, A_{oi}x_i)]$ представляет собой самостоятельную оптимизационную задачу планирования целевого применения i -го КА, а скалярное произведение $(\pi, A_{oi}x_i)$ является механизмом, посредством которого координатор воздействует на подсистемы (модели планирования целевого применения КА), а именно через модификацию целевых функций подсистем, причем компоненты вектора π можно интерпретировать как «цены» конфликтных ресурсов, выраженные в единицах глобальной критериальной функции.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения задачи планирования предлагается использовать алгоритм Данцига – Вульфа. Тогда процесс планирования применения КМКА с использованием координационного подхода можно представить как итерационный процесс (рис. 2)



Рис. 2. Схема решения задачи планирования применения КМКА с использованием координационного подхода

Суть решения задачи заключается в том, что на каждой итерации происходит решение частных задач планирования применения МКА. Результаты решения – планы применения $x_{ir}^*, i = \overline{1, n}$ и соответствующие им значения целевых функций $V_i(x_{ir}^*), i = \overline{1, n}$ сообщаются в координирующую задачу. Здесь x_{ir}^* – оптимальное решение полученное в i -й подсистеме на r -й итерации. На основе полученных значений «координатор» ставит и решает свою задачу, производит расчет координирующего сигнала в соответствии с выражением

$$\lambda_{ir} = (\pi_{ir}, A_{oi}x_{ir}^*), i = \overline{1, n}, \quad (20)$$

$$\lambda_{ir} = (\lambda_{i11}, \lambda_{i12}, \dots, \lambda_{ijs}, \dots, \lambda_{ims_i}), i = \overline{1, n}, \quad (21)$$

и передает его в подсистемы. На следующей итерации происходит решение частных задач планирования с учетом полученного координирующего сигнала. Координирующий сигнал учитывается в целевых функциях подсистем

$$\sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m (\psi_j - \lambda_{ijs}) x_{ijs} \rightarrow \max. \quad (22)$$

Производится решение частных задач с модернизированной целевой функцией. Результаты решения сообщаются координатору. Критерием окончания итерационного процесса планирования является сходимость координирующего сигнала.

Значение координирующего сигнала интерпретируется как «штраф», накладываемый на то или иное применение МКА, что заставляет подсистемы (блоки) перепланировать свое решение.

Использование данного подхода при решении задачи координационного планирования применения кластера МКА можно реализовать в виде следующего алгоритма.

Шаг 0. Задается начальный номер итерации $r = 1$. Координатор сообщает во все подсистемы одинаковый координирующий сигнал $\lambda_i = 0, i = \overline{1, n}$.

Шаг 1. Подсистемы решают оптимизационные задачи вида

$$\sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m (\psi_j - \lambda_{ijs}) x_{ijs} \rightarrow \max; \quad (23)$$

$$A_i x_i \leq b_i; \quad (24)$$

$$x_i = \text{col}(x_{ijs}), x_{ijs} \in \{0, 1\}; \quad (25)$$

$$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, s = \overline{1, K_i}.$$

В результате решения задач (23)–(25) находятся оптимальные планы целевого применения КА на r -й итерации $x_{ij}^{*r} = \text{col}(x_{ijs}^{*r})$. В соответствии с полученными значениями решениями

производится вычисление значений целевой функции $V_{ir}, V_{ir} = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m c_i x_{ijs}^{*r}$. Значения x_{ij}^{*r} ,

V_{ir} сообщаются координатору (в координирующую задачу).

Шаг 2. Строится и решается координирующая задача в виде

$$\sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^r V_{iy} \delta_{iy} \rightarrow \max; \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^r \alpha_{iy} \delta_{iy} \leq e; \quad (27)$$

$$\sum_{y=1}^r \delta_{iy} \leq 1, i = \overline{1, n}; \quad (28)$$

$$\delta_{iy} \in [0, 1], i = \overline{1, n}, y = \overline{1, r}.$$

Здесь вектор α_{iy} вычисляется как $\alpha_{iy} = A_{0i} x_{iy}^{*r}, i = \overline{1, n}, y = \overline{1, r}$, где $\{x_{iy}^{*r}\}, i = \overline{1, n}, y = \overline{1, r}$ – множество решений, переданных подсистемами координатору на r итерациях. Данная задача относится к классу задач линейного программирования и может решаться симплекс-методом.

Шаг 3. Производится расчет координирующих сигналов. В ходе решения задачи (26)–(28) симплекс-методом помимо решения прямой задачи, вычисляется решение двойственной задачи – π_r . Производится расчет координирующего сигнала для каждой подсистемы по формуле (20).

Шаг 4. Сравнивается значение полученного координирующего сигнала со значением координирующего сигнала на предыдущей итерации. Если выполняется условие $\pi_r = \pi_{r-1}$, то решения подсистем не будут меняться – получено оптимально решение, переход на шаг 6.

Шаг 5. Изменяется номер итерации $r = r + 1$. Значения координирующего сигнала сообщаются в подсистемы. Переход на шаг 1.

Шаг 6. Формируются оптимальные решения подсистем по правилу:

$$x_i^* = \sum_{y=1}^r \delta_{iy}^* x_{iy}^*, i = \overline{1, n}. \quad (29)$$

Здесь: $x_{iy}^*, i = \overline{1, n}, y = \overline{1, r}$ – решения i -й подсистемы, которые сообщались координатору на y -й итерации решения задачи; $\delta_{iy}^*, i = \overline{1, n}, y = \overline{1, r}$ – компоненты вектора оптимального решения координирующей задачи, полученного на последней итерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенным отличием предлагаемого подхода к планированию применения КМКА является декомпозиция исходной задачи с целью уменьшения ее размерности, а, как следствие, повышения оперативности и качества управления КМКА.

Список используемых источников

1. *Бакланов А.И.* Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – № 2. – С. 80–91.
2. *Карсаев О.В.* Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий космических аппаратов // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. № 5 (48). – С. 150–180.
3. *Казак Б.В., Ваулин А.Е., Ваулин В.Г.* Решение задачи оптимального размещения ограниченного ресурса методом динамического программирования // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. – М.: МО СССР, 1978. – Вып. № 2. – С. 245–251.
4. *Черныш В.В., Мануйлов Ю.С.* Оптимизация пространственных разворотов динамических объектов с присоединенным УДЭ // Методы и средства управления и контроля. – Л.: МО СССР, 1987. – С. 28–31.
5. *Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В.* Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989. – 263 с.
6. *Мануйлов Ю.С.* Метод и алгоритм оптимального автономного целераспределения на борту космического аппарата наблюдения / Ю.С. Мануйлов, С.В. Зиновьев, Е.А. Новиков, И.Д. Белобоков // Сборник алгоритмов и программ типовых задач / под ред. И.А. Кудряшова. – МО РФ, 2005. – Вып. № 23. – С. 31–53.
7. *Власов В.А., Горбулин В.И., Панченко В.В.* Оптимизация плана применения оптико-электронной аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли при наблюдении заданных объектов // Информация и космос. – 2008. – № 4. – С. 51–56.
8. *Канторович Л.В.* Математические методы организации и планирования производства. – Л.: ЛГУ, 1959. – С. 36–38.
9. *Данциг Дж.* Линейное программирование, его обобщения и применение. – М.: Прогресс, 1966. – С. 52–63.
10. *Колесников К.Г., Масалкин А.А., Москвин Б.В.* Модель планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. № 1 (655). – С. 122–127.

11. *Москвин Б.В.* Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2005. – 385 с.
12. *Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю.* Дискретное программирование / под ред. Д.Б. Юдина. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
13. *Москвин Б.В.* Построение клик простого графа. // Сборник алгоритмов и программ типовых задач / под ред. И.А. Кудряшова. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1986. – Вып. 7. – С. 66–72.

Н.В. Коченов,
кандидат воен. наук;
И.А. Ледянкин,
кандидат техн. наук;
Д.В. Негодин;
О.Е. Нестеренко,
кандидат техн. наук

МОДЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МНОВариАНТНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ ЕГО КОМПОНЕНТАМИ

Известно, что в условиях лавинообразного увеличения потока входящей радиолокационной информации на средствах мониторинга баллистических и космических объектов возникает объективная необходимость повышения оперативности и результативности функционирования вычислительных средств и систем.

Показано, что одним из направлений повышения производительности вычислительных систем, осуществляющих обработку информации на автоматизированных системах мониторинга баллистических и космических объектов, является оптимизация структур параллельных программ, реализующих алгоритмы обработки информации, для их выполнения на конкретных вычислительных комплексах.

Выявлена объективная необходимость учета особенностей обмена информацией между компонентами перспективного вычислительного комплекса, имеющего многовариантные возможности по организации обмена данными между вычислительными узлами, при разработке комплекса специального программного обеспечения для повышения его производительности за счет рационального распределения операций параллельной программы между вычислительными узлами.

Предложена концептуальная модель перспективного вычислительного комплекса, реализующего многовариантные возможности по организации обмена данными между его компонентами. Разработанная модель учитывает топологию сетей взаимодействия вычислительных модулей, структуру и характеристики программы, реализующей алгоритм обработки информации, а также план выполнения операций программы на компонентах вычислительного комплекса.

Ключевые слова: вычислительная система, вычислительный комплекс, оптимизация параллельных вычислений, планирование обработки информации, параллельные программы.

ВВЕДЕНИЕ

Значительной частью современной военной политики России является политика государства в области совершенствования существующей системы национальной обороны и системы мониторинга баллистических и космических объектов, в частности. В настоящее время средства данной системы являются объектами пристального внимания со стороны государства. Заметной современной тенденцией в данной области является расширение возможностей этих средств по обнаружению и сопровождению целей, для снабжения дополнительной информацией смежных радиолокационных систем. Кроме этого, возрастающие возможности средств воздушно-космического нападения вероятного противника накладывают новые требования к системам обработки информации вычислительных комплексов, входящих в состав средств систем мониторинга баллистических и космических объектов. Таким образом, исследования, направленные на повышение оперативности обработки радиолокационной информации, являются актуальными [1, 2].

Рост масштабов и сложности решаемых задач вычислительными системами, осуществляющими обработку радиолокационной информации на средствах мониторинга баллистических и космических объектов, в условиях повышения требований к эффективности функционирования со стороны системы управления, обуславливает необходимость поиска

возможностей для увеличения показателей производительности вычислительных комплексов, при выполнении целевых задач [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее часто в современной литературе для оценивания производительности вычислительной системы (ВС) используется ее пиковая производительность [4, 5], которая в наиболее простом виде определяется в условиях максимально-возможной загрузки узлов и отсутствия простоев в работе. Частными же показателями в таком случае является количество выполняемых операций с плавающей или фиксированной точкой в секунду. Однако на практике, при реализации конкретных параллельных программ на данных системах, фактическая производительность колеблется от 2 до 90% от пиковой [6].

Кроме этого, одним из основных показателей эффективности функционирования вычислительных систем является среднее количество обработанных заявок в единицу времени. Очевидно, что данный показатель находится в прямой зависимости от показателя производительности вычислительных средств, обрабатывающих поступающие заявки.

Таким образом, в рамках исследования, целесообразно, в качестве основного показателя, характеризующего производительность вычислительной системы, использовать ожидаемую длительность выполнения параллельной программы, реализующей алгоритм обработки радиолокационной информации.

Дано:

Модель Ψ процесса обработки радиолокационной информации, на вычислительной системе средства системы мониторинга баллистических и космических объектов:

$$\Psi = \langle S, P, |X|, T_g, P_g \rangle,$$

где S – характеристики модели, описывающей топологию построения вычислительной системы;

P – модель программы, подлежащей реализации на вычислительной системе S ;

$|X|$ – план выполнения эквивалентного варианта параллельной программы на вычислительной системе.

Необходимо найти \tilde{T}_g и \tilde{P}_g при реализации $|X|$ на S , при этом T_g – ожидаемая длительность выполнения параллельной программы, реализующей алгоритм обработки радиолокационной информации; P_g – вероятность потери информации при обслуживании поступающей радиолокационной информации.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА, СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В [7, 8] обоснован оригинальный подход к оптимизации информационной структуры параллельной программы для ее выполнения на распределенной иерархической вычислительной системе, учитывающий размещение элементов программного обеспечения на вычислительных модулях на основе использования точных аналитических методов ветвей и границ, а также линейного программирования.

В настоящий момент существует несколько ведущих предприятий широко известных своими достижениями в области исследования и разработки архитектуры микропроцессоров, проектирования микропроцессоров, микропроцессорных наборов систем памяти, контроллеров, компьютеров на базе микропроцессоров собственной разработки, компьютерных моду-

лей и логических устройств, а также высокоэффективных оптимизирующих и двоичных компиляторов и программного обеспечения. Однако у специалистов этих организаций особый интерес вызывают вопросы разработки программного обеспечения для высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем, реализующих многовариантные возможности по организации обмена данными между его компонентами.

В перспективном вычислительном комплексе с мульти-интерфейсными компонентами, используемом при построении средств обработки информации автоматизированной системы мониторинга баллистических и космических объектов, подразумевается использование нескольких сетевых интерфейсов для обмена информацией между его компонентами. Так, для обмена между центральными процессорными устройствами, входящими в состав вычислительных узлов, используется шина HyperTransport с пропускной способностью до 50 Гбайт/с. Вычислительные узлы имеют возможности по информационному обмену в вычислительной сети, на основе коммутатора универсальной шины InfiniBand (4 дифференциальные пары для передачи последовательных сигналов с пропускной способностью до 10 Гбайт/с), а также на основе волоконно-оптического распределенного интерфейса FDDI (с возможностью синхронизированной передачи до 10 Гбайт/с). Структура данного вычислительного комплекса, реализующего многовариантные возможности по организации обмена данными между его компонентами, представлена на рис. 1.

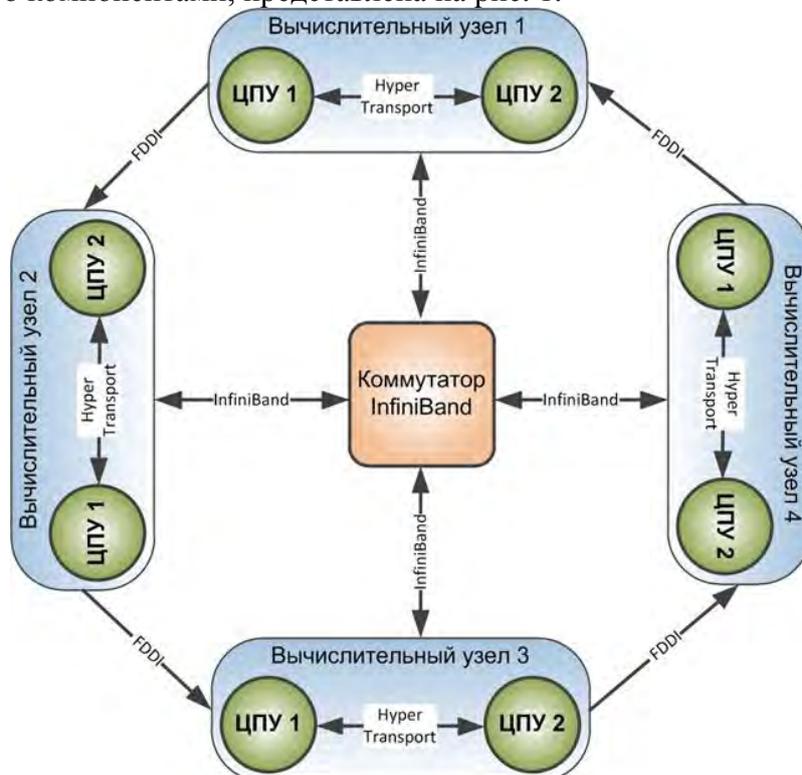


Рис. 1. Топологическая структура перспективного вычислительного комплекса с многовариантными возможностями по информационному обмену между его компонентами

МОДЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Топологическая структура перспективного вычислительного комплекса (рис. 1), в графо-аналитической форме может быть представлена в виде матрицы смежности, в узлах которой находятся кортежи значений пропускных способностей канала, по которым может быть ор-

ганизовано информационное взаимодействие между двумя произвольными центральными процессорными устройствами:

$$G = |A|_{n \times n}, a_{ij} = \{c_0, c_1, c_2\}, \quad (1)$$

где n – общее число центральных процессорных устройств в вычислительном комплексе.

При условии возможности информационного обмена между процессорными устройствами i и j пропускная способность интерфейса протокола HyperTransport – c_0 , пропускная способность интерфейса протокола InfiniBand – c_1 , пропускная способность интерфейса протокола FDDI – c_2 .

Примем предположения:

– представленная вычислительная система является гомогенной, т. е. вычислительные узлы, входящие в ее состав, являются аппаратно-идентичными друг другу, а производительность отдельного процессорного устройства равна g (операций/с);

– требования по объему оперативного запоминающего устройства выполняются в любой момент времени. Обращений к внешним запоминающим устройствам в рамках организации виртуальной памяти нет.

Основными характеристиками, описывающими узловой коммутатор K InfiniBand, являются пропускная способность q и размер буферного запоминающего устройства m .

Таким образом, модель вычислительной системы описывается множеством ее характеристик:

$$S = \langle |A|_{n \times n}, K(q, m), g, n \rangle \quad (2)$$

Основная задача любой вычислительной системы состоит в преобразовании хранящейся в памяти информации. Она всегда реализуется как выполнение последовательности простых однозначных функций (программ) над содержимым отдельных слов. Как правило, все функции имеют не более двух аргументов. Функции могут использовать и/или изменять как слова целиком, так и их части. Вообще говоря, разные вычислительные системы могут иметь разные наборы исполняемых функций. Однако очень часто эти наборы функционально совпадают во многом или полностью, различаясь лишь техникой реализации. Наиболее распространенными функциями являются простейшие арифметические операции над числами (сложение, вычитание, умножение и т. д.) и логические операции булевой алгебры над битами слов (конъюнкция, дизъюнкция и т. д.). Обычно в терминологии вычислительных систем все функции называются операциями, а значение аргумента, иногда сам аргумент и даже адрес слова, где содержится аргумент, – операндами [8–12].

Формой всестороннего отражения процесса выполнения программы на вычислительной системе при заданных исходных данных является его представление в виде направленного графа. Выполняемые операции служат вершинами этого графа, а ребра показывают необходимость непосредственного использования результата одной операции для исполнения другой. Если результат операции 1 не используется непосредственно операцией 2, то определенные ими вершины не будут связаны ребром [9, 13–15].

Если под условными ветвлениями в программе содержится небольшое количество операций, то эти операции целесообразно укрупнить и свести алгоритм к детерминированному. Если же под условными операторами содержатся большие детерминированные участки программы, будем рассматривать именно эти участки.

Допустим, существует некоторый граф алгоритма и реализующая его программа, выполняемая на ВС с одним исполнителем (один процессор и одно ядро). Соответственно, преобразование данных и их ввод-вывод не могут осуществляться одновременно. Пронумеруем вершины графа в порядке, совпадающем с порядком выполнения соответствующих операций на вычислительной системе, от 1 до максимального значения. Тогда все узлы получают свои уникальные номера, значения которых лежат в диапазоне от 1 до m , где m – количество

вершин в графе. При этом если из узла с номером i ведет дуга в узел с номером j , то $i < j$. Таким образом, пример направленного ациклического мультиграфа алгоритма выполнения некоторой вычислительной задачи представлен на рис. 2.

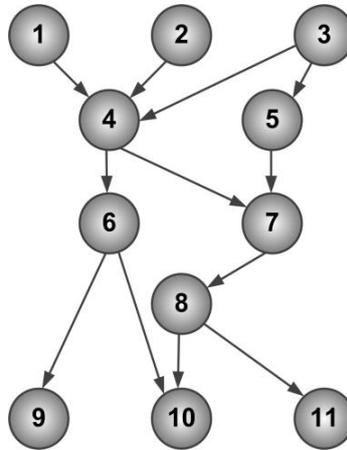


Рис. 2. Граф выполнения алгоритма вычислительной задачи

Таким образом, вершины в данном графе это операции вычислительной задачи, а ветви характеризуют зависимость операций между собой по входным-выходным данным. Каждая операция характеризуется длительностью t_i ее выполнения, а каждая зависимость по входным данным – объемом d_i передаваемых данных.

Следовательно, модель программы P , подлежащей реализации на вычислительной системе S может быть представлена в виде:

$$P = \langle G(V, U), T, D \rangle, \quad (3)$$

где $G(V, U)$ – матрица инцидентности соответствующая, графу, описывающему процесс выполнения программы, причем V – вершины графа, а U – его ветви;

T – множество длительностей выполнения каждой операции, $T = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$;

D – множество значений объемов передаваемых данных, между операциями,

$$D = \{d_0, d_1, \dots, d_s\}.$$

Кроме всего прочего, реализация программы P на вычислительной системе S предполагает формирование матрицы $|X|$ назначений операций программы, реализующей алгоритм вычислительной задачи, на центральные процессорные устройства вычислительных узлов:

$$|X| = \|x_{ij}\|_{n \times m}, \quad (4)$$

где n – общее количество центральных процессорных устройств на вычислительных узлах вычислительной системы;

m – количество операций алгоритма вычислительной задачи.

Матрицу $|X|$ будем называть планом выполнения эквивалентного варианта параллельной программы на вычислительной системе.

Если принять предположение о том, что на обработку одной единицы информации используется n циклов некоторой программы обработки X , то можно сделать вывод о том, что количество обработанных заявок в единицу времени C зависит от длительности выполнения T_g программы, реализующей алгоритм обработки и количество циклов его выполнения:

$$C = f(n, T_g). \quad (5)$$

Таким образом, задача определения длительности выполнения программы, реализующей алгоритм вычислительной задачи обработки информации, имеет особую актуальность, так как позволяет уже на этапе разработки программного обеспечения определить возможный выигрыш в количестве обработанных заявок в единицу времени.

Длительность T_g выполнения полученной реализации определяется временем окончания последней операции на одном из модулей:

$$T_g = \max \{t_k - t_0\}, k = \overline{0, m}, \quad (6)$$

где t_k – момент окончания операции k ;

t_0 – момент начала выполнения эквивалентной реализации параллельной программы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислительная техника в современных автоматизированных системах играет ключевую роль, существенно влияя на их тактико-технические характеристики. Это в полной мере относится и к системам мониторинга баллистических и космических объектов, определяющим в значительной степени уровень обороноспособности страны в целом. Развитие данных систем объективно связано с повышением их степени автоматизации, усложнением программно-алгоритмического обеспечения, повышением скоротечности обработки информации в режиме реального времени. В этой связи актуальными являются вопросы создания и применения базовых средств вычислительной техники и общего программного обеспечения удовлетворяющего заданным требованиям, предназначенных для оснащения перспективных средств и систем мониторинга баллистических и космических объектов.

Разработанная модель перспективного вычислительного комплекса, предназначенного для оснащения систем обработки радиолокационной информации, имеющего многовариантные возможности по организации обмена данными между его компонентами позволяет отразить существенные для целей исследования характеристики исследуемой вычислительной системы. Она отличается от известных учетом особенностей оригинальной топологической структуры перспективного вычислительного комплекса, узловые элементы которого имеют несколько сетевых интерфейсов для обмена информацией.

Практическая значимость заключается в том, что при использовании данной модели появляется возможность избежать применения натурального или полунатурного моделирования при тестировании параллельных программ, реализующих алгоритмы обработки радиолокационной информации на средствах мониторинга баллистических и космических объектов, выполняющих задачи государственной важности.

Список используемых источников

1. Основной объект воздействия противника / Ю.В. Бородакий, А.Ю. Добродеев, П.А. Нащекин, И.В. Бутусов // Воздушно-космическая оборона. – М.: ООО «Издательский дом “ВПК-Медиа”», 2014. – № 2. – С. 22–28.
2. Мельник Н. Основные направления развития средств воздушно-космического нападения США и НАТО. Ч. 1 // Зарубежное военное обозрение. – 2015. – № 8. – С. 65–71.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – Киев: КВиЦ, 2000. – 352 с.
4. Курносоев М.Г. Модели и алгоритмы вложения параллельных программ в распределенные вычислительные системы: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2008. – 177 с.
5. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.

6. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 599 с.
7. *Легков К.Е., Нестеренко О.Е.* Алгоритм формирования информационной структуры параллельных программ иерархической вычислительной системы // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – № 1. – С. 52–59.
8. *Нестеренко О.Е., Легков К.Е.* Методика формирования информационной структуры параллельных программ вычислительной системы специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 3. – С. 18–30.
9. *Карпов В.Е.* Введение в распараллеливание алгоритмов и программ // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 231–272.
10. *Евреинов Э.В.* Однородные вычислительные системы, структуры и среды. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.
11. *Хорошевский В.Г.* Архитектура вычислительных систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 252 с.
12. *Хорошевский В.Г.* Инженерный анализ функционирования вычислительных машин и систем. – М.: Радио и связь, 1987. – 257 с.
13. *Almasi G.S., Gottlieb A.* Highly Parallel Computing. – Redwood City: Benjamin-Cummings publishers, 1989. – 132 p.
14. *Поспелов Д.А.* Введение в теорию вычислительных систем. – М.: Сов. радио, 1972. – 543 с.
15. *Таненбаум Э., Ван С.М.* Распределенные системы: принципы и парадигмы. – СПб.: Питер, 2003. – 523 с.

А.Н. Кравцов,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Н. Новиков,
кандидат техн. наук;
О.А. Ширямов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИНЫ С УЧЕТОМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье предложена математическая модель прогнозирования изменения критической составляющей погрешности рабочего эталона единицы величины, входящего в состав рабочих мест по поверке средств измерений, размещенных на базе мобильных многофункциональных метрологических комплексов, с учетом априорной информации. В силу объективных трудностей нахождения функциональной зависимости изменения критической составляющей погрешности рабочего эталона от воздействия факторов окружающей среды предложено исследовать данный процесс как функцию времени, а воздействие факторов на погрешность учитывать опосредованно при моделировании изменения погрешности во времени. Предложенная математическая модель, в отличие от существующих, позволяет учитывать, с одной стороны, индивидуальный характер изменения критической составляющей погрешности конкретного рабочего эталона в конкретных условиях эксплуатации, с другой – наличие априорной информации об измерении аналогичных параметров у однотипных рабочих эталонов. В статье приведено описание процесса нахождения наиболее правдоподобных оценок математического ожидания параметров прогнозирующей функции.

Ключевые слова: критическая составляющая погрешности, априорная информация, оценки параметров прогнозирующей функции, метод максимального правдоподобия, плотность распределения вероятностей ошибок результатов измерения погрешности.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ состояния и особенностей совершенствования метрологического обеспечения испытаний и эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры (далее – ОНКИ) в современных условиях показал, что в силу специфики состава, условий эксплуатации ОНКИ и решаемых ими задач метрологическое обеспечение является важным видом технического обеспечения [1]. При этом одним из способов повышения эффективности метрологического обслуживания измерительной техники, входящей в состав ОНКИ является применение мобильных многофункциональных метрологических комплексов, таких как подвижные лаборатории измерительной техники (далее – ПЛИТ). Они предназначены для метрологического обслуживания средств измерений (далее – СИ) непосредственно на местах их использования по назначению и позволяют в ряде случаев обеспечить достижение лучших показателей результативности и оперативности проведения аттестационно-поверочных работ при установленных ограничениях на удельные эксплуатационные затраты в сравнении с теми же показателями при проведении данных работ в стационаре [2]. Однако, на сегодняшний день не решен ряд принципиальных задач, связанных с поддержанием рабочих эталонов единиц величин (далее – РЭ) ПЛИТ в состоянии метрологической исправности, к основным из которых относится разработка методов прогнозирования технического состояния РЭ и методик корректировки межаттестационных интервалов (далее – МАИ) РЭ, учитывающих результаты такого прогнозирования. Как следствие значительное число РЭ ПЛИТ эксплуатируется в состоянии метрологического отказа, что в свою очередь может повлечь за собой в лучшем случае большие материальные, а в худшем и людские потери.

Анализ существующего научно-методического обеспечения корректировки МАИ РЭ выявил ряд существенных недостатков, связанных с тем, что несмотря на глубокую проработку общих вопросов прогнозирования технического состояния РЭ, вопросам исследования характера протекания процесса изменения критической составляющей погрешности РЭ, обусловленного особенностями эксплуатации РЭ в составе ПЛИТ уделялось недостаточно внимания. Существующие математические модели прогнозирования изменения технического состояния РЭ [3–10], как правило, являются либо групповыми, но тогда для их применения необходимо набрать большую группу РЭ и эти модели не учитывают индивидуальные особенности конкретного РЭ, либо строго индивидуальными, но тогда для их применения необходимо собрать довольно большую статистику об изменении погрешности у конкретного РЭ, что не позволяет применять такие модели для новых РЭ. Таким образом, можно сделать вывод, что задача разработки математической модели прогнозирования изменения критической составляющей погрешности рабочего эталона единицы величины с учетом априорной информации является актуальной.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ходе эксплуатации техническое состояние РЭ постоянно изменяется. Это объясняется постоянным воздействием на РЭ различных внешних и внутренних факторов. Основными факторами внешней среды, которые влияют на РЭ при их эксплуатации в ПЛИТ и которые значительно ускоряют процессы изменения ТС РЭ, являются температурные, механические и влажностные факторы. Следует учитывать, что рассмотренные факторы воздействуют на РЭ в комплексе, что приводит к еще более быстрому темпу старения эталонов [2].

Таким образом, математическую модель изменения значения погрешности РЭ в зависимости от влияния на него различных факторов внешней среды можно представить в виде:

$$Y(t) = S(x_1, x_2, \dots, x_n; t), \quad (1)$$

где x_j – j -й фактор внешней среды;

t – время.

Для построения модели в виде (1) необходимо организовать широкомасштабный, длительный и дорогостоящий ряд экспериментов, который позволит выявить зависимость изменения значения погрешности РЭ от каждого фактора в отдельности и определить их взаимосвязь друг с другом. Однако, организация таких экспериментов в современных условиях вряд ли возможна.

В связи с этим, процесс изменения значения погрешности РЭ ПЛИТ предлагается описывать с помощью математической модели, отражающей изменение значения критической составляющей погрешности РЭ, т. е. той составляющей погрешности РЭ, которая оказывает наибольшее влияние на амплитуду и скорость изменения основной погрешности РЭ, построение которой осуществляется на основе реальных данных, получаемых в процессе эксплуатации РЭ. При этом воздействие факторов на погрешность оценивается опосредованно, а их случайный характер и взаимовлияние учитывается при моделировании изменения погрешности во времени. Тогда процесс изменения значения погрешности во времени можно представить в виде нестационарного случайного процесса, выраженного суммой двух независимых компонентов: необратимого $w(t)$ и обратимого $\hat{u}(t)$:

$$\hat{Y}(t) = w(t) + \hat{u}(t). \quad (2)$$

Исследования показывают, что оба этих компонента относятся и представляют один и тот же процесс, но относятся к разному частотному спектру [11].

Первый компонент обусловлен протеканием необратимых физических процессов старения и износа внутри РЭ. Эти процессы протекают довольно медленно и имеют гладкий характер. Поэтому этот компонент достаточно точно может быть описан детерминированной функцией.

Второй компонент обусловлен воздействием на РЭ большого числа случайных факторов, носящих как внутренний, так и внешний характер. По своим свойствам обратимый компонент можно представить в виде случайной функции с довольно широким спектром. Исследования показывают, что данный компонент является стационарным случайным процессом, с нулевым математическим ожиданием, постоянной дисперсией и периодом корреляции меньшим интервала наблюдения.

Таким образом, процесс изменения критической составляющей погрешности РЭ $\hat{Y}(t)$ можно достаточно точно представить с помощью детерминированного компонента $w(t)$, который описывается функцией времени, а случайный компонент $\hat{u}(t)$ может быть представлен в виде случайной вариации параметров этой функции:

$$\hat{y} = S(\hat{\vartheta}_k, t), \quad (3)$$

где $\hat{\vartheta}_k$ – случайные значения параметров прогнозирующей функции.

Зададимся конкретной формой прогнозирующей функции. В литературе, посвященной исследованию процессов старения РЭ [12, 13], показывается, что с одной стороны довольно простой функцией, а с другой точно описывающей изменение погрешности РЭ, – является экспоненциальная функция вида:

$$\hat{y}(t_i) = \Delta_0 + \hat{\vartheta}_1 [\exp(-\hat{\vartheta}_2 t_i) - 1], \quad (4)$$

где Δ_0 – начальное значение погрешности РЭ;

$\hat{\vartheta}_1, \hat{\vartheta}_2$ – случайные значения параметров прогнозирующей функции;

$\hat{y}(t_i)$ – прогнозируемое значение погрешности РЭ.

При этом, значение $|\vartheta_1|$ показывает, к какой величине будет стремиться погрешность СИ при $t \rightarrow \infty$, т. е. это «амплитуда» изменения погрешности, а величина параметра ϑ_2 характеризует скорость протекания процесса.

Как известно, получить наиболее правдоподобные, состоятельные и эффективные оценки случайных величин $\tilde{\vartheta}_1^*$ и $\tilde{\vartheta}_2^*$ можно с помощью метода максимального правдоподобия [14]. При этом критерием оптимальности служит минимальное значение суммы квадратов отклонений расчетных значений процесса от реальных. Рассмотрим метод максимального правдоподобия применительно к конкретной форме прогнозирующей функции.

Согласно методу максимального правдоподобия, сначала составляется модель опыта, на основе которой выдвигается гипотеза о форме закона распределения вероятностей появления тех или иных результатов опыта. Причем, численные значения некоторых параметров закона распределения остаются неизвестными. Далее находят вероятность совместного появления множества опытных данных $\{\hat{y}_i\}$ и в полученном выражении фиксируют значения всех случайных величин, т. е. всей случайной выборки $\{\hat{y}_i\}$. Это выражение становится детерминированной функцией от неизвестных параметров ϑ_1 и ϑ_2 , которые нужно определить. Функция правдоподобия для рассмотренного случая будет выглядеть следующим образом:

$$G(\{\vartheta_k\}) = \varphi(\{\hat{y}_i\} | \{\vartheta_k\}), \quad (5)$$

где $\varphi(\{\hat{y}_i\}|\{\vartheta_k\})$ – плотность распределения результатов контроля изменения значения критической составляющей погрешности РЭ при условии, что параметры $\hat{\vartheta}_1, \hat{\vartheta}_2$ принимают конкретное значение (апостериорная информация).

Однако в такой форме функция учитывает только индивидуальные особенности конкретного РЭ, и если опытных данных $\{\hat{y}_i\}$ слишком мало, то нельзя получить приемлемой точности прогнозирования. Анализ существующих подходов к прогнозированию технического состояния радиоэлектронной аппаратуры позволяет сделать вывод о том, что для повышения эффективности прогнозирования в функцию правдоподобия необходимо ввести априорную информацию [15, 16, 17]. Наилучшие результаты при решении этой задачи могут получиться, если известны априорные характеристики случайного процесса изменения погрешности, протекающего в аналогичных РЭ.

В рассматриваемом случае в качестве априорной информации предлагается использовать закон распределения параметров $\hat{\vartheta}_1$ и $\hat{\vartheta}_2$, числовые характеристики которого определяются по данным об изменении погрешности у аналогичных РЭ. Таким образом, функция правдоподобия примет вид:

$$G(\{\hat{\vartheta}_k\}) = \varphi(\{\hat{y}_i\}|\{\vartheta_k\})\varphi(\{\hat{\vartheta}_k\}), \quad (6)$$

где $\varphi(\{\hat{\vartheta}_k\})$ – плотность распределения параметров прогнозирующей функции (априорная информация).

Оценки параметров получаются при решении системы уравнений, в которой частные производные функции правдоподобия по параметрам ϑ_1 и ϑ_2 приравнены к нулю:

$$\frac{\partial G(\{\hat{\vartheta}_k\})}{\partial \hat{\vartheta}_k} = 0. \quad (7)$$

Однако, в рассматриваемом случае, при нахождении решения, вместо функции правдоподобия удобнее воспользоваться логарифмической функцией правдоподобия, которая достигает максимума в той же точке, что и обычная функция правдоподобия. Логарифмическая функция правдоподобия имеет следующий вид:

$$L(\{\hat{\vartheta}_k\}) = \ln[G(\{\hat{\vartheta}_k\})] = \ln[\varphi(\{\hat{y}_i\}|\{\vartheta_k\})\varphi(\{\hat{\vartheta}_k\})]. \quad (8)$$

При этом определение наиболее правдоподобных оценок параметров будет находиться из аналогичной системы уравнений:

$$\frac{\partial L(\{\hat{\vartheta}_k\})}{\partial \vartheta_k} = 0 \quad (9)$$

или

$$\frac{\partial \varphi(\{\hat{y}_i\}|\{\vartheta_k\})}{\partial \vartheta_k} \frac{1}{\varphi(\{\hat{y}_i\}|\{\vartheta_k\})} + \frac{\partial \varphi(\{\vartheta_k\})}{\partial \vartheta_k} \frac{1}{\varphi(\{\hat{\vartheta}_k\})} = 0. \quad (10)$$

Таким образом, после обработки n результатов измерения основной погрешности РЭ можно получить оценки математического ожидания параметров $\tilde{\vartheta}_1^*$ и $\tilde{\vartheta}_2^*$. Используя полученные оценки, можно строить прогноз изменения критической составляющей погрешности РЭ на заданном интервале.

РЕШЕНИЕ

Опишем процесс нахождения оценок параметров прогнозирующей функции. Необходимыми исходными данными для нахождения функции правдоподобия являются априорная и апостериорная информация.

1. Априорная информация – плотность распределения априорной вероятности параметров прогнозирующей функции.

В общем случае, закон распределения вероятности параметров $\hat{\vartheta}_1$ и $\hat{\vartheta}_2$ можно принять нормальным законом на плоскости:

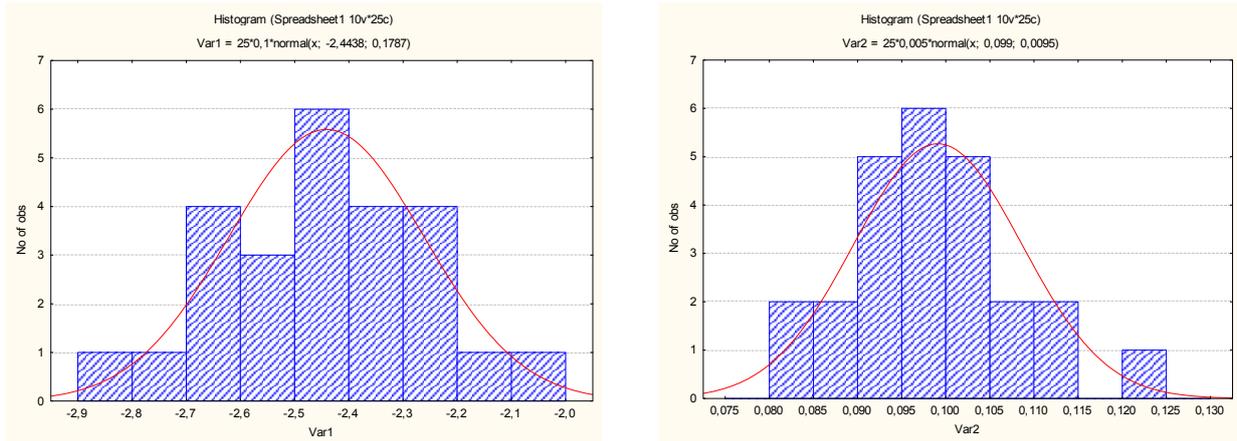
$$\varphi\left(\{\hat{\vartheta}_k\}\right) = \frac{1}{(2\pi)|\sigma_{kl}|^{1/2}} \exp\left[\frac{1}{2(1-r)} \times \left(\frac{(\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{2r(\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1)(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right]. \quad (11)$$

Это подтверждается практическими данными, полученными по результатам обработки информации об изменении погрешности у РЭ из состава различных ПЛИТ [2]. По полученным оценкам параметров $\hat{\vartheta}_1$ и $\hat{\vartheta}_2$ для каждого РЭ (табл. 1) были построены гистограммы (рис. 1, а, б), которые подтвердили гипотезу о нормальности распределения вероятности параметров $\tilde{\vartheta}_1^*$ и $\tilde{\vartheta}_2^*$.

Таблица 1

Оценки значений параметров $\hat{\vartheta}_1$ и $\hat{\vartheta}_2$ для каждого РЭ из состава различных ПЛИТ

Параметр	Номер РЭ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tilde{\vartheta}_1 (\times 10^{-9})$	-2,514	-2,200	-2,416	-2,496	-2,546	-2,298	-2,367	-2,612	-2,262
$\tilde{\vartheta}_2$	0,093	0,097	0,094	0,099	0,096	0,092	0,096	0,108	0,085
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\tilde{\vartheta}_1 (\times 10^{-9})$	-2,345	-2,554	-2,807	-2,29	-2,625	-2,341	-2,437	-2,380	-2,752
$\tilde{\vartheta}_2$	0,099	0,109	0,124	0,105	0,104	0,094	0,104	0,098	0,113
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$\tilde{\vartheta}_1 (\times 10^{-9})$	-2,672	-2,079	-2,428	-2,611	-2,189	-2,459	-2,415	-2,541	-2,396
$\tilde{\vartheta}_2$	0,101	0,086	0,092	0,111	0,083	0,101	0,090	0,096	0,088



а)

б)

Рис. 1. Гистограммы распределений $\tilde{\vartheta}_1$ и $\tilde{\vartheta}_2$ для РЭ Ч1-74:

а – гистограмма распределения $\tilde{\vartheta}_1$; б – гистограмма распределения $\tilde{\vartheta}_2$

2. Апостериорная информация – плотность распределения вероятностей ошибок результатов измерения основной погрешности РЭ.

По аналогии с априорной информацией можно предположить, что условная функция распределения результатов контроля изменения погрешности РЭ так же является нормальной. Для i -го результата контроля его условная плотность распределения будет описываться следующим выражением:

$$\varphi(\{\hat{y}_i\} | \{\vartheta_k\}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_n}} \exp \left[\frac{y_i - y(t_i)}{2D_n} \right]^2 \tag{12}$$

С учетом рассмотренных выражений (6), (11) и (12) функция правдоподобия примет вид:

$$G(\{\hat{\vartheta}_k\}) = \frac{1}{(2\pi)^{(2+n)/2} \sigma_n^n |\sigma_{kl}|^{1/2}} \exp \left[-\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y(t_i))^2}{2\sigma_n^2} - \frac{1}{2(1-r)} \left(\frac{(\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{2r(\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1)(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2)}{\sigma_1 \sigma_2} + \frac{(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right] \tag{13}$$

Если прологарифмировать последнее выражение, то получим логарифмическую функцию правдоподобия:

$$L(\{\hat{\vartheta}_k\}) = \ln \left[\frac{1}{(2\pi)^{(2+n)/2} \sigma_n^n |\sigma_{kl}|^{1/2}} \right] + \left[-\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y(t_i))^2}{2\sigma_n^2} - \frac{1}{2(1-r)} \left(\frac{(\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{2r(\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1)(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2)}{\sigma_1 \sigma_2} + \frac{(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right] \tag{14}$$

Дифференцируя последнее выражение по ϑ_1 и ϑ_2 , получим систему нелинейных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \Delta_0 - \vartheta_1 (\exp(-\vartheta_2 t_i) - 1)) (\exp(-\vartheta_2 t_i) - 1)]}{\sigma_n^2} - \\ - \frac{1}{(1-r)} \left(\frac{\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1}{\sigma_1^2} + \frac{r(\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2)}{\sigma_1 \sigma_2} \right) = 0, \\ \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \Delta_0 - \vartheta_1 (\exp(-\vartheta_2 t_i) - 1)) (\vartheta_1 t_i \exp(-\vartheta_2 t_i))] }{\sigma_n^2} - \\ - \frac{1}{(1-r)} \left(\frac{\vartheta_2 - \bar{\vartheta}_2}{\sigma_2^2} + \frac{r(\vartheta_1 - \bar{\vartheta}_1)}{\sigma_1 \sigma_2} \right) = 0. \end{array} \right. \quad (15)$$

Решение этой системы даст совокупность наиболее правдоподобных оценок математического ожидания параметров $\tilde{\vartheta}_1^*$ и $\tilde{\vartheta}_2^*$.

Соответственно, оценка математического ожидания будущего значения погрешности РЭ производится на основе выражения (4) и оценок математического ожидания параметров $\tilde{\vartheta}_1^*$ и $\tilde{\vartheta}_2^*$:

$$\tilde{y}(t_{\text{буд}}) = \Delta_0 + \tilde{\vartheta}_1^* \left[\exp(-\tilde{\vartheta}_2^* t_{\text{буд}}) - 1 \right]. \quad (16)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель позволяет на основе апостериорных данных, отражающих индивидуальный характер изменения критической составляющей погрешности конкретного рабочего эталона в конкретных условиях эксплуатации, и априорных данных об изменении аналогичных параметров у однотипных рабочих эталонов получить оценку математического ожидания величины критической составляющей погрешности РЭ в будущем.

Кроме того, полученные в модели оценки параметров прогнозирующей функции $\tilde{\vartheta}_1^*$ и $\tilde{\vartheta}_2^*$ могут быть использованы при прогнозировании значений вероятности метрологической исправности РЭ, что, в свою очередь, позволит впоследствии корректировать МАИ РЭ с учетом его метрологической надежности.

Список используемых источников

1. Чапоргин В.С., Панов Д.В., Поморцев П.М. Состояние и перспективы развития системы метрологического обеспечения ракетно-космической техники // Мир измерений. – 2013. – № 9. – С. 3–7.
2. Исследование методов передачи единиц величин от эталонов единиц величин I и II рядов эталонам единиц величин низшего разряда и средствам измерений в целях совершенствования локальных поверочных схем 1 и 2 филиалов ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России» шифр «Богучарец – ПАР – 2014»: отчет о НИР (заключ.): 06-02/ «ГНМЦ» МОРФ»; рук. В.В. Швыдун; исполн. И.В. Красавин и др. – МО РФ, 2014. – 250 с. – Инв. №756602.

3. *Окоренков В.Ю.* Метрологическая надежность метеорологических информационно-измерительных систем // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2010. – № 561. – С. 194–212.
4. *Чернышова Т.И., Каменская М.А.* Математическое моделирование электронных измерительных средств при оценке их метрологической надежности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 770–775.
5. *Алексеев В.В., Грубо Е.О., Королев П.Г.* Структуры и алгоритмы коррекции основной погрешности измерительного канала с использованием измеряемой величины // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 4. – С. 23–32.
6. *Жаднов В.В.* Методы повышения достоверности оценки межповерочных интервалов электронных измерительных приборов // Качество. Инновации. Образование. – 2015. – № 11 (126). – С. 20–27.
7. *Гусеница Я.Н., Шерстобитов С.А., Малахов А.В.* Метод обоснования межповерочных интервалов средств измерений // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 44–48.
8. *Новиков А.Н.* Алгоритм индивидуального прогнозирования предельных экономически целесообразных сроков эксплуатации измерительных комплексов // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 4. – С. 19–24.
9. *Новиков А.Н., Миронов А.Н., Пузанков С.В.* Методика построения математической модели изменения во времени критической составляющей погрешности измерений в бортовых измерительных системах космических аппаратов с метрологическим самоконтролем // Информация и Космос. – 2016. – № 2. – С. 118–126.
10. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1991. – 384 с.
11. *Силин В.Б., Заковряшин А.И.* Автоматическое прогнозирование состояния аппаратуры управления и наблюдения. – М.: Энергия, 1983. – 336 с.
12. *Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С.* Динамика погрешностей средств измерений. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.
13. *Кузнецов В.А., Петров В.А.* Закон распределения погрешности измерений с учетом времени эксплуатации измерительных приборов // Измерительная техника. – 1992. – № 7. – С. 5–6.
14. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1991. – 831 с.
15. *Миронов А.Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – МО РФ. – 2000. – 430 с.
16. *Кравцов А.Н., Лавров Р.О., Мищенко И.В.* Метрологическое обеспечение эксплуатации радиоэлектронных и инфокоммуникационных систем // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Т. 3. – С. 64–68.
17. Prediction intervals for exponential smoothing using two new classes of state space models / R.J. Hyndman, A.B. Koehler, J.K. Ord, R.D. Snyder // Journal of Forecasting. – 2005. – Vol. 4 (1). – P. 17–37.

Е.Б. Самойлов,
кандидат техн. наук;
В.В. Шмелёв,
кандидат техн. наук

МЕТОД СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИХ ПРОГРАММ ПОТОКОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагается научно-методическая основа мониторинга процессов функционирования космических средств. Мониторинг представляется потоковыми вычислениями над технической и технологической информацией, формируемой объектом контроля. Классическая процедура разработки программы вычислений адаптируется к использованию аппарата формального описания алгоритмов с помощью модифицированных цветных сетей Петри и G-сетей, которые объединяются термином «вычислительные сети». В качестве исходной информации для синтеза используются таблицы хронометража и диаграммы Ганта, как наиболее распространенные способы представления циклограмм функционирования космических средств. Отличительным достоинством предложенного метода синтеза является возможность корректировки создаваемой программы с целью выявления и компенсации ошибок синтеза. Для обеспечения такой возможности предусматриваются процедуры синтаксической и семантической верификации программы. Практическая значимость метода заключается в учете при синтезе программ потоковых вычислений факторов, негативно воздействующих на процессы формирования, сбора, обработки и анализа телеметрической информации космических средств. Изложение сопровождается примером синтеза программы потоковых вычислений.

Ключевые слова: теория вычислений, функционально-логическое программирование, потоковые вычисления, обработка измерительной информации, мониторинг технических систем.

ВВЕДЕНИЕ

Системный анализ [1] причин аварий в отечественной космической отрасли позволяет сделать вывод о наличии значимого недостатка в системе мониторинга состояния технических систем (ТС) космических средств (КСр). Сегодня назрела острая необходимость изменения подхода к анализу телеметрической информации КСр. Если раньше было достаточно определения точечных значений контролируемых характеристик и сравнения их с допустимыми границами, то сегодня необходимо оценивание правильности процессов функционирования систем объекта мониторинга в целом. Для достижения этой цели предлагается проводить мониторинг КСр на основе функционально-логических программ потоковых вычислений по разнородной информации, получаемой в результате испытаний и применения КСр. Методу синтеза таких программ и посвящена статья.

В статье используется следующий ряд понятий. *Программой* называется система вычислений, которая для некоторого набора исходных данных позволяет по однозначно определенной последовательности действий, выполняемых «механически» (без участия человека) получить результат [2]. *Функционально-логической программой* называется программа, создаваемая в результате применения принципов функционального программирования с реализацией логических взаимосвязей между операторами. Под *потоковыми вычислениями* понимается обработка информации различного рода (измерительной, технологической) с целью определения состояния ТС, т. е. осуществления мониторинга ТС. Особенностью процесса обработки такой информации является обеспечение параллелизма и асинхронности выполнения совокупностей операторов [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ПРОГРАММЫ ПОТОКОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Исходные данные для синтеза программы

Исходная спецификация программы потоковых вычислений при мониторинге процесса R^l (кратко – программа R^l) представляется кортежем:

$$R^l = \langle S^l, L \rangle, \quad (1)$$

где S^l – это множество операций программы R^l , $S^l = \{S_k^l \mid k = 1, \dots, \text{card}(I_s)\}$, при этом I_s – множество номеров операций;

L – множество кортежей, обуславливающих выполнение операций,
 $L = \{l_k \mid k = 1, \dots, \text{card}(I_s)\}$.

Кортеж l_k определяется следующим образом:

$$l_k = \langle K_k(x), t_k, \tau_k \rangle, \quad (2)$$

где $K_k(x)$ – управляющий кортеж для операции S_k^l , $K_k(x) = \langle B_b^{(k)}(x), B_f^{(k)}(x) \rangle$, при этом $B_b^{(k)}(x)$ – предикат, обуславливающий начало выполнения операции, b – «begin»; $B_f^{(k)}(x)$ – предикат, обуславливающий окончание выполнения операции, f – «finite», x – аргумент предикатов $B_b^{(k)}(x)$ и $B_f^{(k)}(x)$, являющийся типом информации, используемой для мониторинга, $x \in X$, причем X – множество возможных типов аргумента x , в предметной области статьи – это телеметрическая, техническая, технологическая информация;

t_k – момент начала выполнения операции S_k^l ;

τ_k – длительность операции S_k^l .

Величины t_k и τ_k отсчитываются в единицах измерения контролируемого процесса функционирования КСр. Такими единицами могут быть как временные метки системы единого времени, так и события при событийном характере контролируемого процесса.

Требуется найти:

1. Структуру формального описания функционально-логической программы R (кратко – программа R) потоковых вычислений.
2. Структуру формального описания унифицированной модели типовой операции (УМТО) S программы R потоковых вычислений.
3. Структуру формального описания технических ограничений Q программы R .
4. $O: R^l \rightarrow R$ – структуру оператора O преобразования программы R^l в R – оператор синтеза функционально-логической программы R .
5. $\mu: R \rightarrow R^l$ – структуру оператора ресинтеза μ программы R^l по R для проверки частичной правильности программы по идентичным пред- и постусловиям и проверки завершенности программы.
6. $\eta = (\eta_1 \cap \eta_2 \cap \eta_3)$ – структуру предиката η проверки сохранения свойства вычислимости в синтезированной программе R , η_1 – предикат проверки непротиворечивости программы R^l , η_2 – корректности и η_3 – активности.

КОНЦЕПЦИЯ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ

В качестве модельной основы синтеза программ предлагается использовать математический аппарат сетей Петри. Это обосновывается тем, что данный абстрактный инструмент считается пригодным для моделирования именно потоковых вычислений, характеризующих-

ся асинхронностью и параллелизмом [4]. Для сетей Петри определен перечень свойств, таких, как покрываемость, достижимость, активность, ограниченность и эквивалентность, которые после интерпретации могут быть использованы для контроля свойств корректности вычислений.

Анализ известных инструментальных сред проектирования схем или моделей программ на основе сетей Петри (например [4–8]) показал, что они не обладают достаточными описательными возможностями. Кроме того, не вводятся процедуры верификации проектируемых программ, остаются только прорабатываемые в первую очередь процедуры непосредственного синтеза.

Таким образом, предлагается организовать мониторинг состояния КСр путем перевода (синтеза программ) потоковых вычислений из исходного описательного представления в прикладное с использованием модификаций сетей Петри. При этом необходимо обеспечить формальную верификацию и новые моделирующие возможности аппарата синтеза для учета потенциальных особенностей процессов функционирования КСр.

Мониторинг состояния КСр на основе функционально-логических программ потоковых вычислений организуется по схеме, состоящей из трех этапов, концептуальное содержание которых представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схема организации мониторинга состояния ТС КСр на основе функционально-логической программы потоковых вычислений

Рассмотрим каждый этап, уделив основное внимание наиболее важному этапу II.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Процесс функционирования ТС является инвариантом процесса мониторинга состояния данной системы [11]. Это позволяет использовать в качестве исходной спецификации функционально-логической программы существующие представления процессов функционирования ТС, используемые в космической отрасли. Примем в качестве единого прототипа процесса функционирования ТС таблицу хронометража, пример которой приведен в табл. 1, а соответствующая ей диаграмма Ганта – на рис. 2.

Семантически пример спецификации описывает процесс, состоящий из трех последовательных операций O_1 , O_2 и O_3 , первая из которых начинается по внешнему сигналу K , а третья оканчивается по достижению граничного значения измеряемым параметром L .

Таблица 1

Пример таблицы хронометража

№	Операция	База	Время от базы	Длительность
1	O ₁	K	0	t ₁
2	O ₂	Окон O ₁	t ₁	t ₂
3	O ₃	Окон O ₂	t ₂ +t ₁	Π>1

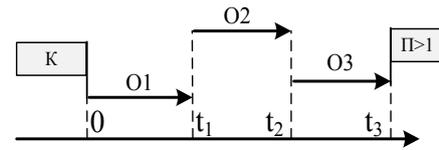


Рис. 2. Пример диаграммы Гантта

В соответствии со вторым шагом этапа I рис. 1 требуется представить исходную информацию в виде кортежа $R^I = \langle S^I, L \rangle$. Исходная спецификация – строгое представление информации о контролируемом процессе на основе модифицированной таблицы хронометража. Такое представление приведено в табл. 2.

Таблица 2

Пример исходной спецификации в виде кортежа $R^I = \langle S^I, L \rangle$ для процесса из таблицы 1

k	$S^I = \{S_k^I \mid k=1,2,3\}$	$B_b^{(k)}$	$B_f^{(k)}$	t _k	τ _k
1	O ₁	K	По длительности	0	t ₁
2	O ₂	Окон O ₁	По длительности	t ₁	t ₂
3	O ₃	Окон O ₂	Π>1	t ₁ + t ₂	t ₃

Рассмотрим в качестве примера семантическое содержание некоторых предикатов из табл. 2. $B_b^{(1)} = K$ означает, что условие начала O₁ определяется моментом поступления команды K, в формальном выражении разрешением для начала O₁ является положительный результат проверки $B_b^{(1)}$, или $Pr(B_b^{(1)}) = true$. $B_f^{(1)} = \text{По длительности}$ означает, что условием окончания O₁ является достижение заданного значения t₁ длительностью выполнения данной операции. $B_b^{(3)} = \text{Окон O}_2$ означает, что условием начала O₃ является окончание выполнения O₂. $B_f^{(3)} = \Pi > 1$ означает, что условием окончания O₃ является превышение значения 1 измеряемым параметром Π.

МОДЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИНТЕЗА ПРОГРАММЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В соответствии с постановкой задачи для синтеза программы необходимо разработать структуры программы R, УМТО S и технических ограничений Q. В статье данные элементы рассматриваются кратко, дополнительную информацию можно получить в [9].

Функционально-логической программой R потоковых вычислений называется теоретико-множественная конструкция на основе вычислительных сетей Петри следующего вида:

$$R = \langle S, J, Q \rangle \tag{3}$$

Для синтаксического представления УМТО S используется теоретико-множественный подход. В графологическом виде УМТО представлена на рис. 3. УМТО, по сути, является агентом или примитивом, которую можно назвать функцией разработанного «языка» контролируемых процессов. Структура УМТО описывается кортежем следующего вида:

$$S = \langle P, T, F, B, H^+, H, M \rangle,$$

где P – конечное непустое множество переменных модели, $P = P_{вн} \cup P_{in} \cup P_{out} = \{p_i \mid i \in I_p\}$ P_{вн}, при этом P_{in}, P_{out} – множества внутренних, входных и выходных переменных соответственно, I_p – множество номеров переменных (переменные являются модификацией позиций в сетях Петри);

Выражение (4) показывает формальное задание функции инцидентности J_k , в графологическом виде конкатенация операторов-процедур представляется соединением или склеиванием соответствующих входных и выходных переменных экземпляров УМТО.

Зададим $Q = \{Q_k | k=1, \dots, card(I_s)\}$ – множество отношений, определяющих варианты выполнения синтезируемой программы. $Q_k = \{q_c^{(k)} | c=1, \dots, card(Q_k)\}$, где $q_c^{(k)}$ – c -е ограничение операции S_k , в математических формализмах данное ограничение является предикатом. Введем в модельное обеспечение синтеза программы потоковых вычислений z -модель (z – значение), представленную в графологическом виде на рис. 5. Z -моделью технических ограничений программы называется теоретико-множественная конструкция следующего вида:

$$q_c^{(k)} = \langle X, ZP, PT, ZF, H, ZM \rangle,$$

где X – множество возможных типов аргумента в ограничении, см. раскрытие кортежа (2);

ZP – конечное непустое множество z -переменных, $ZP = \{zp_i | i=1, \dots, card(I_{ZP})\}$, при этом I_{ZP} – множество номеров z -переменных;

PT – конечное непустое множество предикатных операторов, $PT = \{pt_j | j=1, \dots, card(I_{PT})\}$, при этом I_{PT} – множество номеров предикатных операторов;

ZF – входная функция инцидентности, описывающая входную, всегда однократную дугу от z -переменной zp_i к предикатному оператору pt_j , $ZF: ZP \times PT \rightarrow \{0, 1\}$;

H – выходная функция инцидентности, описывающая кратность выходной дуги от предикатного оператора pt_j в входную переменную $p_i \in P_{in}$, $H: PT \times P \rightarrow \{0, 1\}$;

ZM – функция, которая каждой z -переменной zp_i ставит в соответствие элемент d_i некоторого множества D возможных значений типа информации из множества X , $ZM: ZP \rightarrow D$.

При работе с конкретным типом $x \in X$ к указанным элементам добавляется нижний индекс (x) . Тогда $d_{i(x)}$ – значение используемой при мониторинге информации типа x , например, телеметрируемого параметра x , из некоторого множества $D_{(x)}$ возможных значений типа информации $x \in X$. Таким образом, можно записать $zm_i: zp_i \rightarrow d_{i(x)}$, что означает: функция zm_i сопоставляет с z -переменной zp_i значение $d_{i(x)}$.

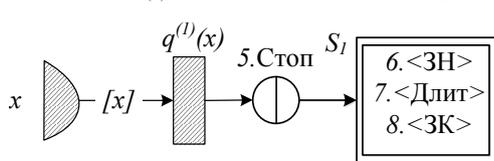


Рис. 5. Схема учета технических ограничений контролируемого процесса функционирования КСр в синтезируемой программе

На рис. 5 z -переменная обозначена заштрихованным полукругом, предикатный оператор – заштрихованным прямоугольником, дуги – стрелками.

Для учета в синтезируемой программе технических ограничений Q с предикатным оператором pt_j сопоставляется предикат $q_c^{(k)}(x)$, в котором аргументом является x . Установим, что предикатный оператор pt_j разрешен, если значение $d_{i(x)}$ его z -переменной zp_i обеспечивает истинность предикату $q_c^{(k)}(x)$. В формальном виде оператор pt_j с сопоставленным предикатом $q_c^{(k)}(x)$ и со значением $d_{i(x)}$ z -переменной zp_i разрешен, если $zm_i: d_{i(x)} \rightarrow Pr(q_c^{(k)}(d_{i(x)})) = true$. Областью применимости $D(q_c^{(k)}(x))$ предикатного оператора pt_j называется такое множество значений $d_{i(x)}$ из $D_{(x)}$, все элементы которого обеспечивают $Pr(q_c^{(k)}(d_{i(x)})) = true$.

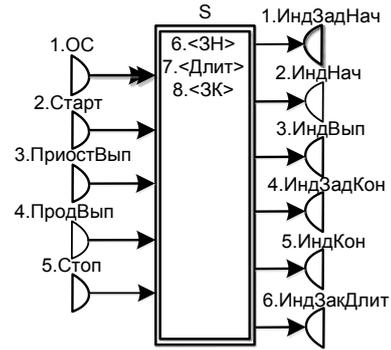


Рис. 4. Оператор-процедура

СИНТЕЗ ПРОГРАММЫ ПОТОКОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Итак, выше было рассмотрено модельное обеспечение синтеза функционально-логических программ потоковых вычислений. Теперь необходимо рассмотреть порядок его применения непосредственно при синтезе.

Этап II схемы организации мониторинга, представленной на рис. 1, является прикладной интерпретацией порядка реализации операторов O , μ и η (см. постановку задачи синтеза).

Подэтап 3 заключается в размножении экземпляров УМТО по количеству операций в процессе, что соответствует количеству строк в табл. 1 и 2. Кратность дуги <Длит> в операции S_k задается равной переменной τ_k :

$$F\langle \text{ОСВып, КонтрольВып} \rangle = \langle \text{Длит} \rangle = \tau_k.$$

Для примера исходной спецификации табл. 2 получим:

$$S = \{S_1, S_2, S_3\}. \quad (5)$$

Для S_1 функция инцидентности $F\langle \text{ОСВып, КонтрольВып} \rangle = t_1$. Для S_2 и S_3 составляются аналогичные выражения.

Таким образом, по результатам выполнения подэтапа 3 графологическая схема синтезируемой программы наполнится тремя экземплярами УМТО. Полученная схема представлена на рис. 6. Кратности дуг <ЗН> и <ЗК> на схеме оператора-процедуры рис. 4, находящиеся внутри прямоугольника, приравниваются нулю. Кратность дуги <Длит> задается в соответствии с равенствами (5).

На подэтапах 4 и 5 формируется структура технологических особенностей вычислений, определяющих порядок выполнения операций. Необходимо определить переход от элементов кортежа (1) к входным переменным «Старт» и «Стоп» для каждого экземпляра УМТО с использованием выражения (4).

Значение переменной «Старт» определяется значением $Pr(B_b^{(k)})$, значение переменной «Стоп» – значением $Pr(B_f^{(k)})$

$$M(\text{Старт}) = \begin{cases} 1, & \text{if } Pr(B_b^{(k)}) = \text{"true"} \\ 0, & \text{if } Pr(B_b^{(k)}) = \text{"false"} \end{cases}; \quad M(\text{Стоп}) = \begin{cases} 1, & \text{if } Pr(B_f^{(k)}) = \text{"true"} \\ 0, & \text{if } Pr(B_f^{(k)}) = \text{"false"} \end{cases}.$$

Для формальной интерпретации технологических ограничений установим, что значения выходных переменных операции S_i определяют условие выполнения экземпляра УМТО S_k . Четыре типа технологических ограничений, определяющих условия начала и окончания операций, задаются с помощью функций инцидентности. В качестве примера рассмотрим порядок задания ограничения типа «Окончание – начало».

Ограничение «Окончание – начало» означает, что S_k начнется после окончания S_i . Данное ограничение формализуется выражениями

$$J_{out}^{(l)}(\text{ИндЗакДлит}, \text{Старт}^{(k)}) = 1 \text{ и } J_{in}^{(k)}(\text{ИндЗакДлит}^{(l)}, \text{Старт}) = 1.$$

Аргументами функций инцидентности являются имена переменных, между которыми формализована связь. Верхние индексы у имен переменных обозначают принадлежность к соответствующему экземпляру УМТО. Отсутствие индекса – принадлежность к экземпляру УМТО, для которого составлена функция инцидентности.

Аналогичным образом задаются ограничения «Начало – начало», «Начало – окончание» и «Окончание – окончание».

В соответствии с (4) и предикатными выражениями табл. 2 функции инцидентности для S_2 примут следующий вид:

$$J_2 = \langle J_{in}^{(2)}(\text{ИндЗакДлит}^{(1)}, \text{Старт}) = 1, J_{out}^{(2)}(\text{ИндЗакДлит}, \text{Старт}^{(3)}) = 1 \rangle.$$

Схема программы с учетом всех внесенных в нее функций инцидентности представлена на рис. 7.

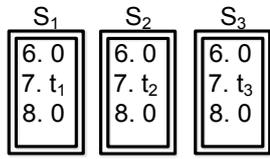


Рис. 6. Схема функционально-логической программы после подэтапа 3

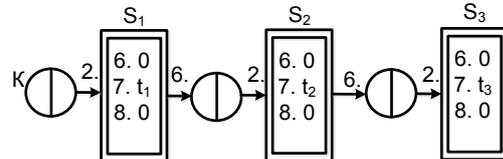


Рис. 7. Схема функционально-логической программы после подэтапа 5

На подэтапах 6 и 7 в схему программы вводятся технические ограничения контролируемого процесса с помощью z -моделей. Условие начала или окончания выполнения операции S_k от внешней информации задается с помощью функции инцидентности между предикатным переходом z -модели и входными переменными экземпляра УМТО:

$$J_{in}^{(k)} : PT \times P_{in}^{(k)} \rightarrow \{0, 1\}; P_{in}^{(k)} = \{\text{ОС, Старт, Стоп, Приостановка, Продолжение}\}.$$

Пример синтеза z -переменной и предикатного оператора для рассматриваемой исходной спецификации (см. табл. 2) представлен следующими выражениями:

$$ZP = \{II\}; PT = \{q^{(3)}(II) = (II > 1)\}; ZF \langle II, q^{(3)}(II) \rangle = 1; H \langle q^{(3)}(II), \text{Стоп}^{(3)} \rangle = 1; zm(II) = 0.$$

Интерпретируется функция H следующим образом: условием окончания операции S_3 является превышения значением z -переменной II значения «1».

Таким образом, результатом синтезирующих подэтапов 3–7 является схема функционально-логической программы, представленная на рис. 8.

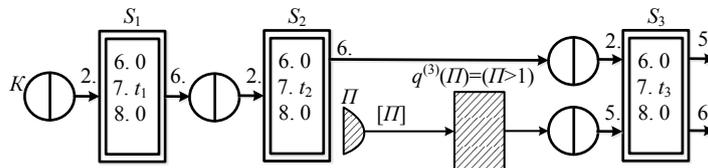


Рис. 8. Схема функционально-логической программы после подэтапа 7

ВЕРИФИКАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ ПОТОКОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Подэтапы 8–11 (см. рис. 1) заключаются в верификации сформированной программы вычислений. Порядок верификации представлен на рис. 9. Полнота и очередность выявления и компенсации ошибок определяются решаемыми при проектировании задачами.

Верификация делится на две части. Первая часть «I. Синтаксическая верификация» заключается в проверке правильности интерпретации исходной спецификации.

Синтаксическая верификация заключается в выполнении стадий ресинтеза программы R в R^I , сопоставления результата ресинтеза и проверки завершаемости программы. Ресинтез схемы программы осуществляется путем формирования элементов кортежей (1) и (2) по содержимому кортежа (3) в три шага.

Шаг 1. Значение τ_k восстанавливается по следующей формуле:

$$\tau_k = F \langle \text{ОСВып}^{(k)}, \text{КонтрольВып}^{(k)} \rangle = \langle \text{Длит}^{(k)} \rangle.$$

Шаг 2. Момент начала выполнения экземпляра УМТО S_k не контролируется, так как данная величина является «планируемой» и зависит от конкретного варианта развития контролируемого процесса.

Шаг 3. Булевы переменные $B_b^{(k)}$ и $B_f^{(k)}$ восстанавливаются путем анализа функции инцидентности $J^{(k)}$. Порядок восстановления ограничения «Окончание – начало» может быть представлен следующей причинно-следственной связью:

$$(J_{in}^{(k)}: P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N; P_{out}^{(l)} \subseteq \{\text{ИндЗакДлит}^{(l)}, \text{ИндЗак}^{(l)}\}, P_{in}^{(k)} \subseteq \{\text{Старт}\}) \Rightarrow B_b^{(k)} = (\text{Окон } O_l).$$

Данная связь определяет, если входная функция инцидентности $J_{in}^{(k)}$ устанавливает связь между выходной переменной «ИндЗакДлит^(l)» (или «ИндЗак^(l)») и входной переменной «Старт» экземпляра УМТО S_k , то условием начала S_k является окончание S_l , т. е. $B_b^{(k)} = \text{Окон } O_l$.

Аналогичные выражения составляются для остальных типов ограничений.

Сопоставление спецификаций осуществляется путем пооперационного сравнения компонентов программы с соответствующими компонентами исходной спецификации, после чего формируется невязка или ошибка синтеза программы. Такой подход является интерпретацией метода Флойда по верификации программ [4].

Вторая часть «II. Семантическая верификация» состоит в выявлении ошибок на уровне смыслового содержания операций программы вычислений. Пример экземпляра УМТО S_3 с некорректностью по входу и выходу представлен на рис. 10. Компенсация некорректности технологических ограничений заключается в добавлении оператора «ИЛИ» для компенсации некорректности по входу, умножающего оператора – для компенсации некорректности по выходу. В качестве примера на рис. 11 представлена компенсация некорректности S_3 по входу с помощью дополнительного «ИЛИ» оператора t_{\cap} .



Рис. 9. Схема верификации функционально-логической программы вычислений

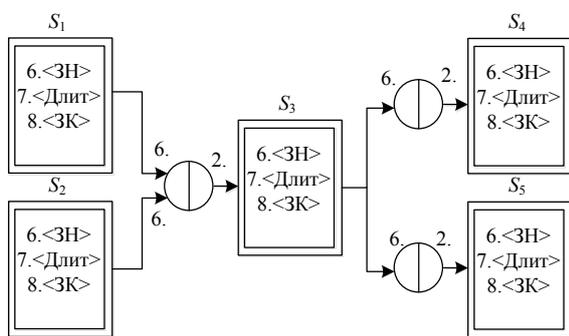


Рис. 10. Программа с некорректностью S_3 по входу и по выходу

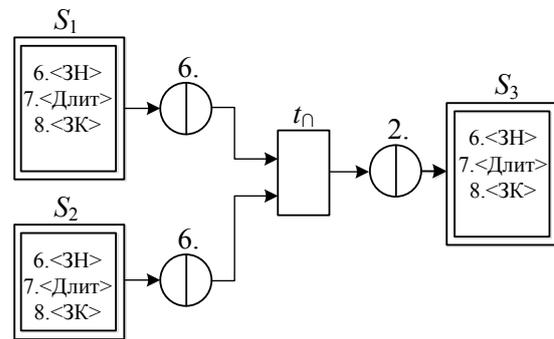


Рис. 11. Программа после компенсации некорректности S_3 по входу

Ошибка, заключающаяся в противоречивости технических ограничений, может быть допущена при задании для одного экземпляра УМТО более одной z-модели. Например, для двух технических ограничений с такими областями применимости, что $D(q_1^{(k)}(x)) \cap D(q_2^{(k)}(x)) = \emptyset$, изменение входных переменных операции S_k будет невозможно. Компенса-

ция противоречивости технических ограничений заключается во введении в программу дополнительного предикатного оператора с областью применимости, равной объединению областей $D(q_1^{(k)}(x))$ и $D(q_2^{(k)}(x))$.

Компенсация пассивности экземпляра УМТО заключается в его удалении из схемы и установки равенства 1 входным переменным экземпляров, зависимым от удаленного по какому-либо типам технологических ограничений.

Подэтап 11 (см. рис. 1) заключается в корректировке программы с целью уменьшения количества смен значений переменных в экземплярах УМТО в единицу времени [10]. Данная задача является актуальной при мониторинге сложных процессов функционирования КСр с использованием измерительной информации, поступающей со значительной частотой, что является характерным для бортовых систем ракет-носителей.

На этапе III (см. рис. 1) проводится интерпретация исполнения программы в соответствии с положениями теории мониторинга и управления состоянием ТС [11], а также оценивание синтезированной программы по системе показателей качества [12]. Оканчивается этап III формированием информационной технологии практического применения функционально-логической программы потоковых вычислений [12].

Практическая проверка [12] представленного в статье метода показала значительное повышение оперативности получения результатов мониторинга двигательной установки ракеты-носителя «Союз-2» при сохранении выполнения заданных требований по достоверности и полноте указанных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены постановка и решение задачи синтеза функционально-логических программ потоковых вычислений при мониторинге состояния КСр. Предложенный метод синтеза программ вычислений позволяет создать «язык» верхнего уровня для описания процессов обработки и анализа измерительной, технической и технологической информации, характеризующей ТС КСр.

Представленный метод отличается:

- реализацией подхода функционального программирования при синтезе программы потоковых вычислений на основе вычислительных сетей;
- разработкой процедуры синтаксической верификации синтезированной программы на основе проверки свойства ее полной (тотальной) правильности;
- формализацией процедур поиска и устранения ошибок (семантической верификацией) на основе интерпретации и проверки корректности свойств сетей Петри.

Практическая значимость и актуальность предложенного метода заключается в учете при синтезе программ вычислений факторов, искажающих процесс мониторинга состояния ТС.

Список используемых источников

1. Риски космических проектов. Анализ причин неудачных космических запусков / Г.П. Беляков и др. // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 5 (57). – С. 208–215.
2. Колмагоров А.Н. К определению алгоритма // Успехи математических наук. – 1958. – Т. XIII, Вып. 4 (82). – С. 3–28.
3. Усталов Д.А. Коллективные потоковые вычисления: реляционные модели и алгоритмы // Моделирование и анализ информационных систем. – 2016. – Вып. 23 (2). – С. 195–210.
4. Виноградов Р.А., Кузьмин Е.В., Соколов В.А. Верификация автоматных программ средствами CPN/Tools // Моделирование и анализ информационных систем. – 2006 – Т. 13, № 2. – С. 4–15.

5. *Амбарцумян А.А.* Сетецентрическое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. – 2017. – Спец. вып. 30.1 «Сетевые модели в управлении». – С. 506–535.
6. *Дьяченко Р.А., Фишер А.В., Богданов В.В.* Моделирование систем сбора и передачи данных с применением цветных сетей Петри // *Fundamental Research*. – 2013. – № 11. – P. 1122–1126.
7. *Westergaard M., Kristensen L.M.* The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools Simulator // *Proc. of 30th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2009)*. *Lecture Notes in Computer Science*. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – № 5606. – P. 313–322.
8. *Jensen K., Kristensen L.M., Wells. L.* Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems // *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*. – 2007. – № 9 (3–4). – P. 213–254.
9. *Шмелёв В.В.* Модели технологических процессов функционирования космических средств // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2015. – № 4. – С. 78–93.
10. *Шмелёв В.В., Мануйлов Ю.С.* Вычислительная ресурсоемкость сетевой модели обработки и анализа измерительной информации ракеты-носителя «Союз-2» // *Информация и космос*. – 2016. – № 1. – С. 155–161.
11. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В.* Новые информационные технологии мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени // *Труды СПИИРАН*. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 249–265.
12. *Шмелёв В.В., Деев В.В., Ткаченко В.В.* Метод организации потоковых вычислений при интеллектуальном мониторинге состояния технических систем // *Научно-технические технологии в космических исследованиях земли*. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 24–35.

В.В. Деев,
доктор техн. наук, профессор;
Е.В. Копкин,
доктор техн. наук;
В.В. Ткаченко,
кандидат техн. наук

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ LTE В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье рассматриваются операции технологии LTE, которые увеличили скорость передачи данных при снижении размеров аппаратуры и эксплуатационных затрат. Излагается принцип формирования сигнала с многочастотной модуляцией, цифровая обработка с использованием быстрого преобразования Фурье, использование в технологии многопозиционной модуляции и помехоустойчивых кодов для повышения частотной и энергетической эффективности передачи данных в робототехнических системах. Представлена обобщенная схема передачи измерительной информации с использованием технологии LTE, в которой отмечена целесообразность применения технологии LTE для оперативной и гибкой передачи измерительной информации.

Ключевые слова: передача данных, стандарт, поток данных, обработка измерительной информации, информационные технологии.

В современных информационных системах для передачи высокоскоростных цифровых потоков внедряются стандарты четвертого поколения. В данном стандарте применяются многочастотная параллельная передача данных, многопозиционная модуляция и турбо-коды.

Целесообразно провести анализ возможностей применения методов обработки данных и сигналов, используемых в стандарте четвертого поколения, для применения в робототехнических системах и космических системах передачи информации.

В статье рассматривается стандарт LTE (Long Time Evolution) [6] в плане анализа возможности его применения в робототехнических системах.

Главное отличие технологии LTE от ранее используемых технологий состоит в резком увеличении рабочей полосы (до 10–20 МГц), что позволило увеличить скорость передачи информации до сотен Мбит/с.

При больших скоростях передачи сигналов сильнее действуют помехи, вызванные межсимвольной интерференцией. Помехи создаются действием предыдущего элемента сигнала при приеме текущего элемента сигнала. Межсимвольная интерференция (МСИ) обусловлена многолучевостью распространения радиоволн и переходными процессами из-за ограниченности полосы канала передачи. МСИ значительно снижается увеличением длительности элемента сигнала путем расчленения высокоскоростного потока данных на множество низкоскоростных потоков. Эти отдельные потоки передаются на индивидуальных несущих колебаниях с разными значениями частот. На передачу одного элемента сигнала на каждой отдельной несущей частоте отводится большее время, из которого МСИ искажает только небольшую часть элемента сигнала.

В стандарте LTE в качестве отдельных несущих колебаний применяется ансамбль ортогональных сигналов. Ортогональными сигналами являются отрезки гармонических колебаний, отличающихся друг от друга частотным сдвигом, кратным значению $1/T_s$, где T_s – длительность отрезка колебания. Этот ансамбль имеет вид

$$s_k(t) = A_k \cos(2\pi kt / T_s + \varphi_k), 0 \leq t \leq T_s, k = 0, \dots, K-1. \quad (1)$$

Амплитуда A_k и начальная фаза φ_k определяются методом модуляции и числом передаваемых кодовых символов. Ортогональность двух произвольных колебаний определяется выражением

$$\int_0^{T_s} S_k(t) S_l(t) dt = 0, \text{ при } k \neq l.$$

Сигнал с многочастотной модуляцией можно записать в следующем виде

$$S(t) = \operatorname{Re} \left[\sum_{k=0}^{K-1} A_k \exp(j\varphi_k) \exp(j2\pi kt / T_s) \right], 0 \leq t \leq T_s, \quad (2)$$

и в комплексной форме

$$\bar{s}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} A_k \exp(j\varphi_k) \exp(j2\pi kt / T_s), 0 \leq t \leq T_s. \quad (3)$$

Многочастотная модуляция с использованием множества ортогональных гармонических сигналов получила название ортогональное частотное мультиплексирование OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), а сигнал называют OFDM.

Аппаратная реализация передатчика и приемника для системы OFDM, где количество несущих колебаний велико, достаточно сложна, так как требует для каждой несущей свой задающий генератор, модулятор и демодулятор. Практически такой многоканальный вариант не реализуем, когда количество несущих колебаний K достигает сотен, тысяч. В технологии LTE реализация формирования и приема сигнала OFDM основана на использовании цифровой обработки сигналов. Цифровые системы – это системы с дискретным временем. Поэтому производится переход к дискретным отсчетам времени $t_n = nT_s/N$, где N – количество отсчетов сигнала на его длительности T_s .

Параллельный поток K модуляционных символов в виде набора комплексных чисел умножаются на ортогональные несущие колебания, представленные в комплексной форме последовательностью числовых значений отсчетов в дискретные моменты времени $t_n = nT_s/N$. После суммирования получается математическое выражение OFDM символа

$$s(t_n) = \sum_k^K A_k \exp(j\varphi_k) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), 0 \leq n \leq N-1. \quad (4)$$

Выражение (4) совпадает с известной формулой обратного дискретного преобразования Фурье [1]

$$x(n) = \sum_k^{N-1} S_k \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), \quad (5)$$

где N – количество отсчетов и количество экспоненциальных составляющих.

Эта формула позволяет вычислить значение $x(n)$ в момент времени $t_n = nT_s/N$ путем суммирования ортогональных составляющих с известными спектральными амплитудами. Если манипуляционные символы $\delta_k = A_k \exp(j\varphi_k)$ рассматривать аналогом спектральных амплитуд S_k и принять $N=K$, то формулы (4) и (5) абсолютно тождественны. Поэтому OFDM сигнал можно сформировать с помощью обратного дискретного преобразования Фурье.

Таким образом, аппаратное решение системы OFDM заменяется математическим, которое решается специальным программным обеспечением.

В LTE технологии используется комбинация частотного и временного множественного доступа. Передача пакетов осуществляется в кадрах длительностью 10 мс. Кадр разделен на 20 временных окон. В окнах применяется частотное разделение каналов. В каждом окне имеется 7 временных интервалов, на которых передаются сигналы OFDM. Два окна образуют подкадр длительностью 1 мс. Подкадр определяет размер ресурсного блока во временной области.

Ресурсные блоки динамично перераспределяются между абонентами. Абоненту может быть выделено от одного до нескольких ресурсных блоков в зависимости от требуемого объема и скорости передачи данных.

Частотный разнос между несущими $\Delta F = 15 \text{ кГц}$, что обеспечивает интервал взаимной ортогональности всех несущих колебаний на интервале $1/\Delta F = 66,7 \text{ мкс}$. Эта величина определяет длительность сигнала OFDM.

Максимальное количество несущих частот в рабочей полосе может достигать 2064. Использовать все несущие частоты не обязательно. Все несущие частоты разделены на ресурсные блоки (РБ). Ресурсный блок состоит из 12 расположенных рядом несущих частот и занимает полосу частот 180 кГц.

В радиointерфейсе стандарта LTE, при формировании сигналов OFDM применена многопозиционная модуляция ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64. Проанализируем возможности этих методов модуляции.

При квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) блокам из k двоичных символов сопоставляются сигналы с разными значениями амплитуды и фазы. Число возможных сигналов $M=2^k$. Блок двоичных символов разделяется на две части. Например, в один подблок входят символы на позициях с нечетными номерами, в другой подблок – символы на позициях с четными номерами. Один подблок определяет амплитуду и полярность импульсов x_{ck} , а другой подблок – амплитуду и полярность импульса x_{sk} . Вид импульсов для КАМ-16 в одном канале схемы показан на рис. 1, а. После умножения импульсов на $\cos \omega_0 t$ и $\sin \omega_0 t$ и суммирования квадратурных сигналов получается результирующий сигнал КАМ. Результат умножения импульсов показан на рис. 1, б.

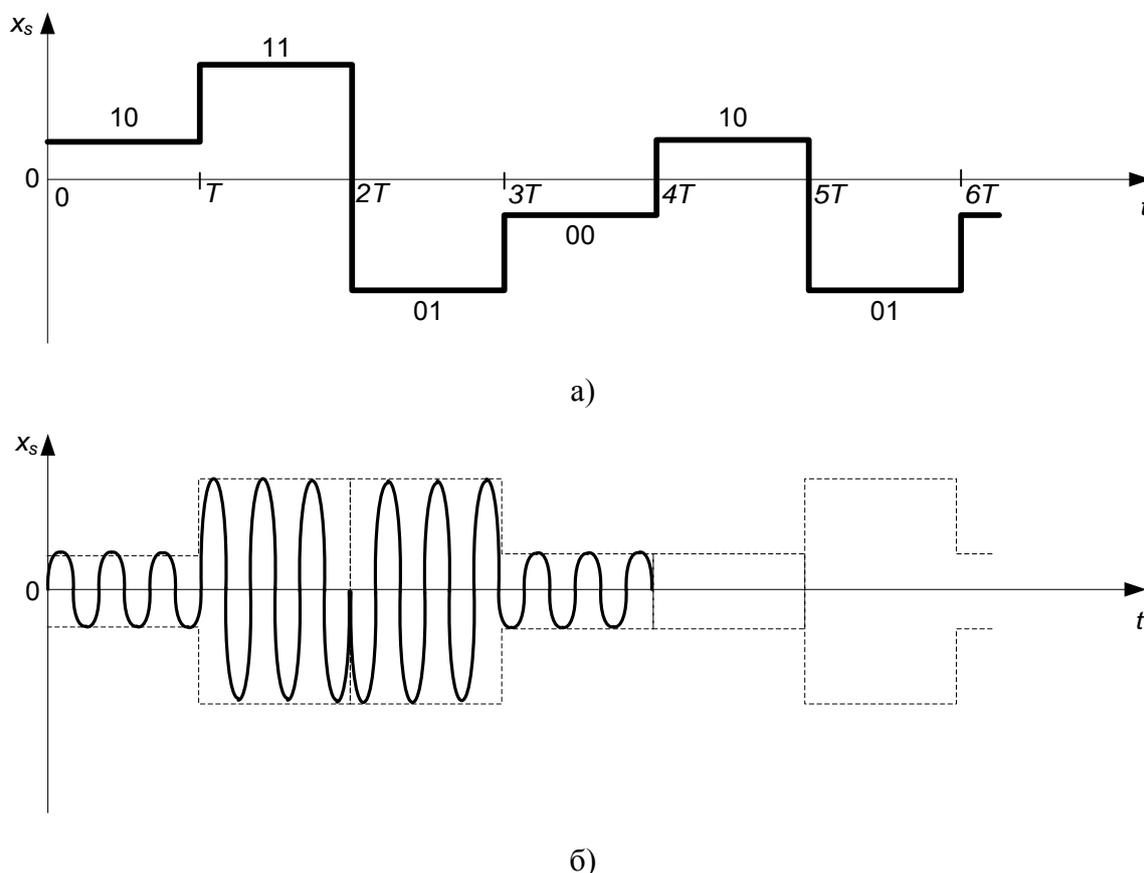


Рис. 1. Сигналы с амплитудной модуляцией

Таким образом, квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) осуществляется путем амплитудной импульсной модуляции синфазной и квадратурной составляющих сигнала. Синфазная составляющая

$$I(t) = A_n \cos \omega_0 t, \quad 0 \leq t \leq T_c, \quad (6)$$

имеет N возможных значений амплитуды

$$A_n = (2n - 1 - N)d, \quad n = 1, 2, \dots, 2N, \quad (7)$$

где $2d$ – расстояние между соседними значениями амплитуды.

В квадратурной составляющей

$$Q(t) = B_n \sin \omega_0 t, \quad 0 \leq t \leq T_c, \quad (8)$$

амплитуда принимает значения

$$B_n = (2n - 1 - N)d, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

Число возможных значений амплитуды связано с позиционностью КАМ-М соотношением $N = \sqrt{M}$.

Используя ортонормированные тригонометрические функции $\psi_1(t) = \cos 2\pi f_0 t / \sqrt{T_c/2}$ и $\psi_2(t) = \sin 2\pi f_0 t / \sqrt{T_c/2}$, сигнал записывается в виде

$$u_i(t) = A_{i1} \sqrt{\frac{T_c}{2}} \psi_1(t) + B_{i2} \sqrt{\frac{T_c}{2}} \psi_2(t) = \sqrt{E_{i1}} \psi_1(t) + \sqrt{E_{i2}} \psi_2(t), \quad 0 < t < T_c, \quad i=1, 2, \dots, M, \quad (10)$$

где A_{i1} и B_{i2} – амплитуды квадратурных составляющих сигнала, $E_{i1} = \frac{A_{i1}^2 T_c}{2}$ и $E_{i2} = \frac{B_{i2}^2 T_c}{2}$ – энергии составляющих сигнала за время его передачи T_c .

Сигнал КАМ-М можно представить точками векторного пространства на плоскости. Сигнальное созвездие КАМ-16 показано на рис. 2.

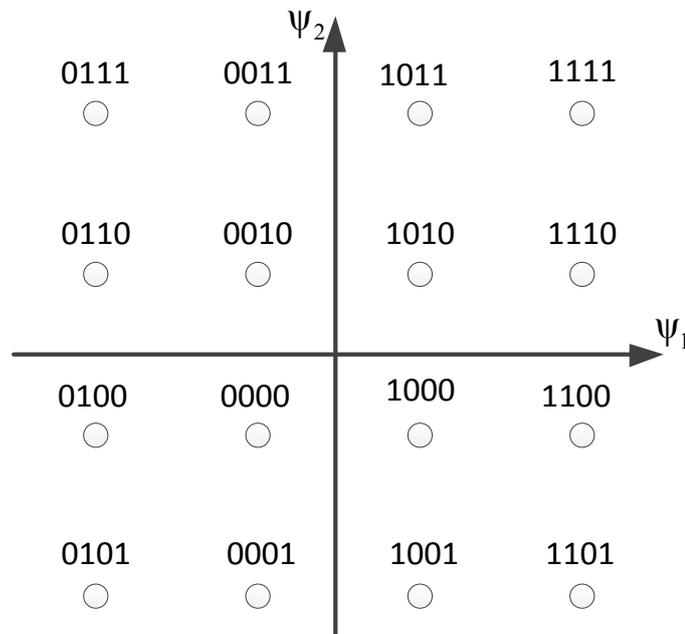


Рис. 2. Сигнальное созвездие КАМ-16

С учетом нормировки уровни амплитуды синфазной или квадратурной составляющих можно показать на числовой оси. На рис. 3 показаны уровни амплуды синфазной составляющей для КАМ-16.

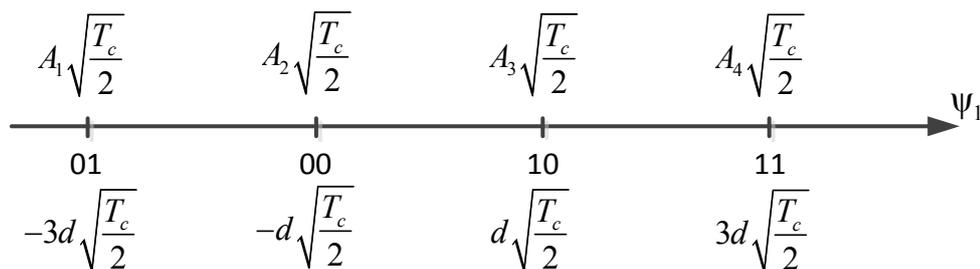


Рис. 3. Уровни амплитуд

На рис. 3 даны пары двоичных символов, сопоставляемые уровням амплитуды. Использован код Грея.

Минимальное расстояние по Евклиду между парой соседних сигнальных точек

$$D_0 = 2d\sqrt{\frac{T_c}{2}}. \quad (11)$$

Средняя энергия сигналов

$$E_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{A_n^2 T_c}{2} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} \frac{d^2 T_c}{2} (2i-1)^2 = \frac{(N^2-1)d^2 T_c}{6}. \quad (12)$$

При получении (13) использовано представление значений амплитуд через величину d . Используя (11), из (12) получаем

$$D_0^2 = \frac{12E_{cp}}{(N^2-1)}. \quad (13)$$

Ошибка произойдет, когда модуль значения помехи будет больше половины минимального расстояния по Евклиду. Выражение для вероятности ошибки приема сигнала КАМ имеет следующий вид:

$$P_M = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} \frac{1}{2} [1 - \Phi_0(\sqrt{\frac{3(\log M)E_0}{2(M-1)N_0}})]. \quad (14)$$

Для определения битовой вероятности ошибки учтем, что наиболее вероятны переходы в ближайшие сигналы, которые находятся на расстоянии D_0 . Такие ошибочные решения дают только искажения в одном бите. В этом случае справедлива формула

$$P_0 = \frac{P_M}{\log M}. \quad (15)$$

По формуле (14) с учетом (15) построены графики зависимости $P_0 = f(E_0/N_0)$ для КАМ-4, КАМ-16 и КАМ-64, которые показаны на рис. 4. График для КАМ-4 совпадает с графиком для ФМ-2 и ФМ-4. Переход на КАМ-М с $M > 4$ требует для сохранения заданной вероятности ошибки h_0^2 и P_0 увеличения значения $h_0^2 = E_0/N_0$. Например, при переходе от ФМ-2 к КАМ-16 для обеспечения $P_0 = 10^{-5}$ надо увеличить h_0^2 от значения 10 до значения 25 (точнее от $h_0^2 = 9,1$ до $h_0^2 = 22,75$), т. е. на 4 дБ. При $M > 8$ система КАМ обеспечивает требуемую вероятность P_0 при значениях h_0^2 меньших, чем система ФМ. При $M=16$ значения h_0^2 отличаются на 4 дБ. Основной причиной является то, что минимальное расстояние по Евклиду между сигналами ФМ меньше аналогичного расстояния при КАМ. Поэтому при $M > 8$ в системах связи применяются сигналы КАМ.

Использование ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64 при заданной полосе частот увеличивает скорость передачи данных, соответственно, в 2, 4 и 6 раз. Использование в сигнале OFDM несущих колебаний, разнесенных в частотной области с минимальным интервалом, и многопозиционной модуляции достигается эффективное использование частотного диапазона.

Применение КАМ-16 и КАМ-64 требует увеличения отношения сигнал/шум, соответственно, в 4 и 8 раз при заданной вероятности ошибки на бит $p = 10^{-6}$ [3, 4]. Снижение требуемого отношения сигнал/шум обеспечивается применением помехоустойчивого кодирования.

В LTE технологии для помехоустойчивого кодирования используются сверточные и турбо-коды. Важным фактом является то, что эти же коды рекомендуются стандартом консультативного комитета по космическим системам передачи данных CCSDS [1, 2]. Причем порядок длины кодируемого блока имеет такие же значения (до 6000 бит). Проанализируем возможности турбо-кода.

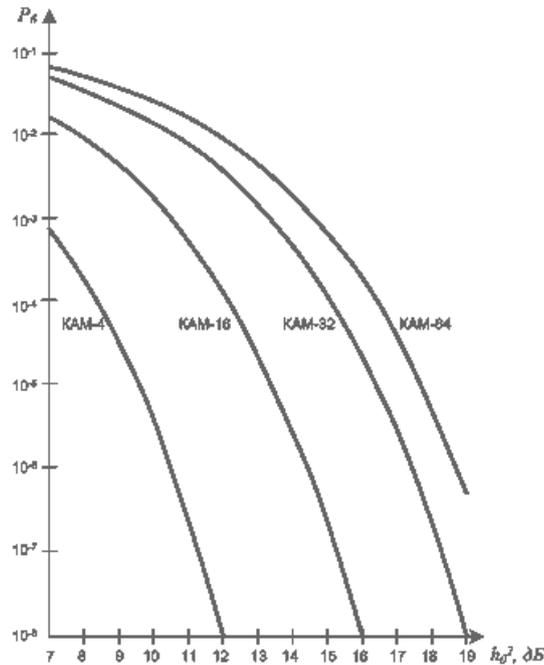


Рис. 4. Графики зависимости вероятности битовой ошибки от превышения $h_0^2 = \frac{E_c}{N_0}$

В турбо-коде в стандарте LTE применяется рекурсивный систематический сверточный кодер с протяженностью кодового ограничения $k_l = 4$, показанный на рис. 5. В статье изложено определение характеристик данного турбо-кода по методу, представленному в [1].

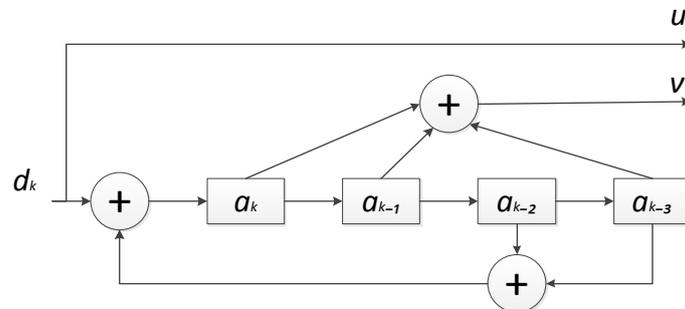


Рис. 5. Рекурсивный систематический кодер

В коде прямая связь задается образующим полиномом $g(x) = 1 + x + x^3$, по которому определяется соотношение для формирования избыточных символов.

$$v_k = a_k \oplus a_{k-1} \oplus a_{k-3}. \quad (16)$$

Обратная связь описывается проверочным полиномом $h(x) = 1 + x^2 + x^3$.

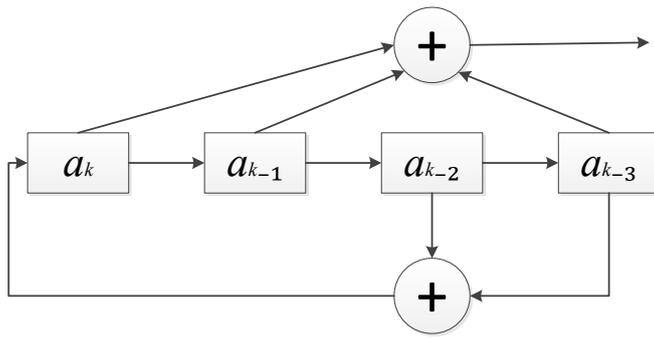
По этому полиному строится проверочная матрица [1, 2]

$$H = \left\| \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & \\ & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right\|. \quad (17)$$

Строки проверочной матрицы определяют уравнение

$$a_k \oplus a_{k-2} \oplus a_{k-3} = 0, \quad k = 3, 4, \dots \quad (18)$$

При подаче на вход кодера символа $d_k = 1$ и последующих символов 0 определяется импульсная характеристика [2]. Работа схемы показана на рис. 6.



		d_i
1	1 0 0 0	1
2	0 1 0 0	1
3	1 0 1 0	1
4	1 1 0 1	1
5	1 1 1 0	0
6	0 1 1 1	0
7	0 0 1 1	1
8	1 0 0 1	0
9	0 1 0 0	1
10	1 0 1 0	1
11	1 1 0 1	1
12	1 1 1 0	0
13	0 1 1 1	0
14	0 0 1 1	1
15	1 0 0 1	0
16	0 1 0 0	1

Рис. 6. Принцип формирования импульсной характеристики

Содержимое ячеек регистра после последовательности 1000 периодически повторяет последовательности 0100, 1010, 1101, 1110, 0111, 0011, 1011 и 1001. Состояние кодера, содержимое двух правых ячеек регистра, повторяет значения 100, 010, 101, 110, 111, 011 и 001. Возврата в нулевое состояние 000 не происходит. Выходная последовательность (импульсная характеристика) является бесконечной, но имеет повторяющиеся части:

$$g = \underbrace{11\ 01\ 01\ 01\ 00\ 00\ 01\ 00}_{\text{repeating}} \quad \underbrace{01\ 01\ 01\ 00\ 00\ 01\ 00}_{\text{repeating}} \quad (19)$$

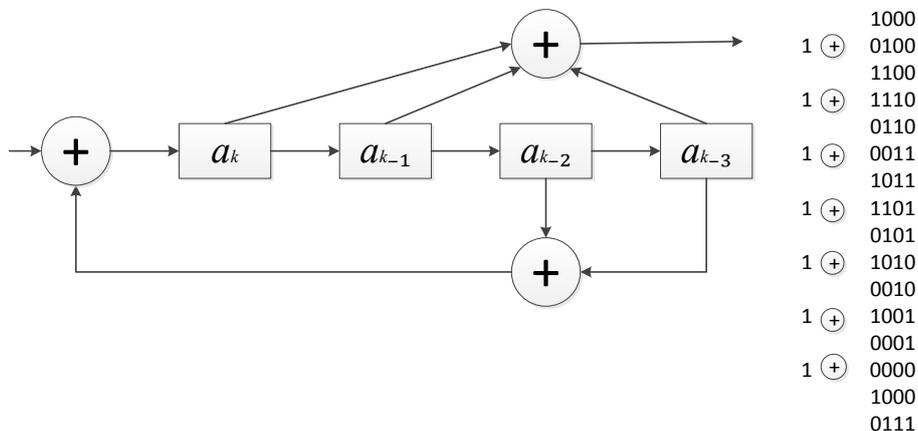
Используя импульсную характеристику, построим порождающую матрицу:

$$G = \begin{pmatrix} 11 & 01 & 01 & 01 & 00 & 00 & 01 & 00 & \dots \\ & 11 & 01 & 01 & 01 & 00 & 00 & 01 & 00 & \dots \\ & & 11 & 01 & 01 & 01 & 00 & 00 & 01 & 00 & \dots \\ & & & 11 & 01 & 01 & 01 & 00 & 00 & 01 & 00 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Порождающая матрица является полубесконечной с бесконечными строками.

Кодирование можно выполнить умножением входной последовательности на матрицу G [1]. При кодировании осуществляется суммирование строк матрицы, которые соответствуют входным символам 1, т. е. производится свертка информационной последовательности с импульсной характеристикой кода.

На рис. 7 рассмотрена работа кодера при подаче на его вход символов 1.



1	⊕	1000
1	⊕	0100
		1100
1	⊕	1110
		0110
1	⊕	0011
		1011
1	⊕	1101
		0101
1	⊕	1010
		0010
1	⊕	1001
		0001
1	⊕	0000
		1000
		0111

Рис. 7. Формирование символов ребер при входном символе 1

При подаче на вход кодера на втором такте символа 1 в регистре устанавливается последовательность 1100, состояние кодера 100. На выходе формируется проверочный символ 0 и блок 10. Если на третьем такте на вход кодера поступает символ 1, в регистре устанавливается последовательность 1110, состояние 110. На выходе образуется проверочный символ 1 и блок 11. В случае нахождения в регистре символов 0011 и поступлении на вход символа 1 кодер переходит из состояния 011 в состояние 101. На выходе формируется блок 10.

Решетчатая диаграмма кода имеет вид, показанный на рис. 8.

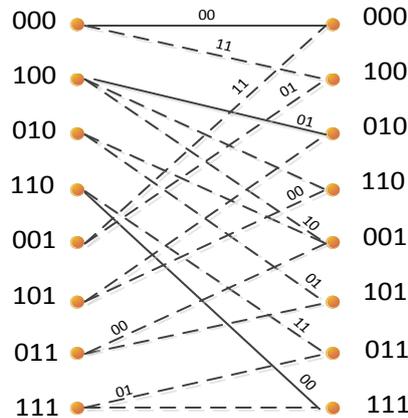


Рис. 8. Решетчатая диаграмма кода

В диаграмме сплошными линиями показаны переходы при поступлении на вход символа $d_k = 0$, пунктирной линией – переходы при $d_k = 1$. При построении диаграммы были использованы результаты работы схем на рис. 6 и рис. 7.

Особенностью решетки является то, что в каждое состояние поступают ветви, соответствующие входным символам 0 и 1.

Например, при поступлении на вход последовательности 101 путем умножения на порождающую матрицу G получаем выходную последовательность $\bar{y} = 110110$. Такую же последовательность получаем, используя решетчатую диаграмму.

В рекурсивном сверточном коде входная последовательность с единичным весом 10000 ... не дает на выходе кодера кодовое слово с минимальным весом. Но кодовые слова с низким весовым коэффициентом существуют.

Входная последовательность 1011 дает самый короткий путь из нулевого состояния в нулевое состояние. Этому пути соответствует выходная последовательность $\bar{y} = 11101111$. Вес этой последовательности $d = 7$ определяет ее минимальное расстояние по Хеммингу от нулевой последовательности.

Используя методику определения энергетического выигрыша из [1] получим оценку минимального энергетического выигрыша от использования данного кода:

$$B = \frac{d_{\min} k}{n} = \frac{7}{2} = 3,5. \quad (21)$$

В турбо-кодировании используется итеративное декодирование, при котором происходит передача вычисленных сведений об апостериорной вероятности информационных символов с выхода первого декодера, использующего проверочные символы первого кодера, на вход второго декодера. Во втором декодере используются проверочные символы второго кодера. После уточнения сведения подаются на вход первого декодера для следующей итерации. Операция обмена сведениями повторяется до тех пор, пока накопившихся сведений не будет достаточно для принятия надежных решений. При использовании рассмотренного кода в турбо-кодере за счет использования итеративного декодирования выигрыш будет больше.

Эксперименты на ЭВМ показали, что с увеличением числа итераций для вероятности ошибки 10^{-5} на выходе декодера на выходе демодулятора можно иметь вероятности ошибки 10^{-1} .

Полученные характеристики кода могут быть использованы при разработке, как программных методов кодирования, так и при разработке более совершенных методов декодирования.

В телеметрических системах [1, 2] передача данных от отдельных датчиков (группы датчиков) может осуществляться с частотным или временным разделением каналов. Причем внедрение цифровых методов передачи позволило полностью перейти на использование временного разделения каналов.

В случае использования LTE технологий между датчиками (группами датчиков) будет распределяться частотно-временной ресурс (ЧВР). Выделенный ресурс в частотной области всегда кратен полосе шириной 180 КГц, а во временной – интервалу длительностью 1 мс. Ресурс может динамично перераспределяться в зависимости от объема и скорости передачи данных от датчиков. Удобно организовать передачу результатов измерений медленноменяющихся и быстроменяющихся параметров. Организуемые в LTE технологии более высокие скорости передачи данных в нисходящих каналах по сравнению с восходящими каналами удовлетворяют потребностям телеметрических систем.

Обобщенная структурная схема бортового устройства обработки телеметрической информации показана на рис. 9.

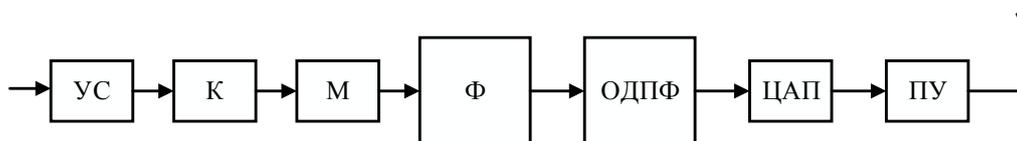


Рис. 9. Структурная схема бортового устройства обработки телеметрической информации

На вход схемы поступают потоки измеренных данных от локальных и основного коммутаторов [2]. Потоки формируются в соответствии с программой выбора необходимого числа определенных параметров. Программа выбора составляется с учетом запросов потребителей. Потоки могут направляться в разные территориально разнесенные пункты. Для реализации управления потоком и передачи его по общему каналу связи в устройстве сегментации (УС) предусмотрена возможность разделения больших пакетов данных источника в меньшие пакеты фиксированной длины – сегменты. В заголовке сегмента находятся адреса портов отправителя и получателей данных.

При обработке сегмента данные делятся на кодовые блоки. Эти блоки в кодере (К) подвергаются процедуре помехоустойчивого кодирования.

Последовательные кодовые блоки объединяются в единый поток данных. Этот поток данных подается на модулятор (М), где преобразуется в последовательность модуляционных символов. Модуляционные символы представляют собой комплексные функции вида $\delta_k = A_k \exp j\varphi_k$. Значения амплитуды A_k и фазы φ_k определяются значениями двоичных символов очередного блока данных. Далее, в формирователе (Ф) производится преобразование последовательного потока модуляционных символов в параллельный поток и распределение символов по несущим колебаниям ресурсных блоков. С помощью обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) получают отсчеты многочастотного сигнала (МЧС) в дискретные моменты времени. Далее, производится цифроаналоговое преобразование многочастотного сигнала (ЦАП), в передающем устройстве (ПУ) производится перенос сигнала на рабочую частоту, усиление по мощности и передача на наземную приемно-регистрирующую аппаратуру (ПРА).

В аппаратуре приема измерительной информации после усиления МЧС с переносом на промежуточную частоту осуществляется прямое дискретное преобразование Фурье (ПДПФ) многочастотного сигнала из временной области в частотную. Демодуляция сигналов на несущих частотах позволяет получать отдельные потоки телеметрических данных.

Применение рассмотренного подхода обеспечивает гарантированную передачу данных и измерительной информации с борта робототехнической системы, находящейся в зоне обслуживания автоматизированной системы управления, что в некоторых случаях необходимо для преодоления пассивных помех. Применение рабочей полосы до 10 МГц позволяет обеспечить трансляцию измерительной информации бортовой аппаратуры в пределах двух частот, трансляция измерительной информации в полосе частот до 20 МГц позволяет обеспечить уверенную передачу данных по одному каналу, без возможности дублирования.

Список используемых источников

1. Тихвенский В.О., Терентьев С.В., Высочин В.П. Сети мобильной связи LTE/ LTE Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура. – М.: Медиа Паблишер, 2014. – 384 с.
2. Гельгор А.Л., Попов Е.А. Технологии LTE мобильной передачи данных. – СПб.: СПбГПУ, 2011. – 324 с.
3. Тихвенский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.В. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 147 с.
4. Биккенин Р.Р. Теория электрической связи : учеб. пособие для студ. высш. учеб. завед. – М.: Академия, 2010. – 336 с.
5. 3GPP TS 36.201. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description (Release 9).
6. 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 10).
7. Автоматизированная обработка телеметрической информации: учебник / В.А. Чикуров, В.В. Деев, В.В. Шмелёв и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 473 с.
8. Чельшев В.Д., Якимовец В.В. Радиоэлектронные системы органов административного и военного управления. – СПб.: ВАС им. С.М. Будённого, 2014. – Ч. 1. – 210 с.
9. Григорьев В.А. Сигналы передачи сообщений: учеб. пособие. – СПб.: ВАС им. С.М. Будённого, 2015. – 176 с.
10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
11. Деев В.В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. – СПб.: Наука, 2007. – 267 с.
12. Деев В.В. Многопозиционная модуляция: учеб. пособие. – СПб.: ВАС им. С.М. Будённого, 2011. – 160 с.
13. Деев В.В. Методы модуляции и кодирования в системах связи с общим каналом: учеб. пособие. – СПб.: ВАС им. С.М. Будённого, 2011. – 140 с.
14. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2003. – 348 с.
15. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.
16. ECSSE-ST-50-12C-Space-Wire-Links, nodes, routers and networks. – European Cooperation for Space Standardization. – 2008. – 129 с.

С.А. Лепешкин,
кандидат техн. наук, доцент;
О.А. Мишуков

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассматриваются особенности совместной обработки разноспектральных изображений в автоматизированных системах обработки данных дистанционного зондирования распределенных объектов. Проведенные исследования обусловлены необходимостью повышения качества функционирования автоматизированных систем обработки данных дистанционного зондирования распределенных объектов, в которых используются датчики различной физической природы. Каждый датчик позволяет получать изображения распределенных объектов в различных спектральных диапазонах, обладает как преимуществами, так и ограничениями в применении. Ограничения в применении отдельных датчиков приводят к снижению информативности получаемых изображений. В статье предложен способ совместной обработки оптических и радиолокационных изображений в автоматизированных системах обработки данных дистанционного зондирования распределенных объектов, основу которого составляет процедура комплексирования изображений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, автоматизированная система обработки данных дистанционного зондирования, комплексирование изображений, датчики различной физической природы, информативность изображений.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие науки и техники, расширение круга задач, решаемых методами дистанционного зондирования, привели к активному развитию многоканальных автоматизированных систем обработки данных дистанционного зондирования распределенных объектов (АСОД ДЗРО), в которых используются датчики различной физической природы: оптические, радиолокационные, инфракрасные и др. Данные системы обеспечивают возможность получения изображений распределенных объектов в различных спектральных диапазонах, с различным пространственным разрешением и при различных условиях: в разное время суток, независимо от времени года, при любой погоде. Наиболее важную роль в данных системах играют датчики, получающие изображения в оптическом диапазоне и радиодиапазоне, которые обладают высокой детализацией. Каждый из них позволяет получать изображения распределенных объектов и имеет в применении, как преимущества, так и ограничения различной физической природы. Изображения в оптическом диапазоне содержат информацию об излученной или переотраженной солнечной энергии, о химическом составе поверхностного слоя, в то время как изображения, полученные радиолокационными средствами, предоставляют данные о геометрических и физических параметрах поверхности: шероховатости, ориентации, физической структуре и диэлектрических свойствах. Ограничения в применении отдельных датчиков приводят к снижению информативности получаемых изображений.

Одним из путей повышения качества функционирования АСОД ДЗРО является совместная обработка оптических и радиолокационных изображений, которая предполагает комплексирование данных различных систем формирования в одно изображение с наилучшим пространственным разрешением, содержащим дополнительные дешифровочные признаки, которые позволяют повысить эффективность интерпретации исследуемых объектов.

Сложность такого подхода определяется необходимостью объединения данных, существенно различающихся по структуре и характеристикам, сформированных в разных спек-

тральных диапазонах с различным пространственным разрешением. Поэтому на сегодняшний день не удалось добиться значительных успехов в решении вопросов объединения оптических и радиолокационных изображений в рамках процедуры «слияния».

Таким образом, задача выбора эффективных методов совместной обработки оптических и радиолокационных изображений в настоящее время является актуальной.

СТРАВНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Для формирования радиолокационных изображений (РЛИ) с высокой детализацией в настоящее время широко используются радиолокационные системы с синтезируемой апертурой антенны (РСА) [1] авиационного и космического базирования (рис. 1).

Съемка земной поверхности при синтезировании апертуры осуществляется в наклонной плоскости. Геометрия задачи зондирования при прямом синтезе апертуры показана на рис. 1, а, на котором обозначены: \vec{V} – вектор путевой скорости летательного аппарата (ЛА); x – проекция траектории на поверхность Земли (путевая дальность); y – дальность до отражающего элемента по поверхности Земли; $R(t)$ – наклонная дальность в момент времени t ; Δy – полоса захвата (полоса съемки); H – высота полета; L_s – длина отрезка пути ЛА, на котором принимается отраженный сигнал; θ – ширина диаграммы направленности антенны по азимуту.

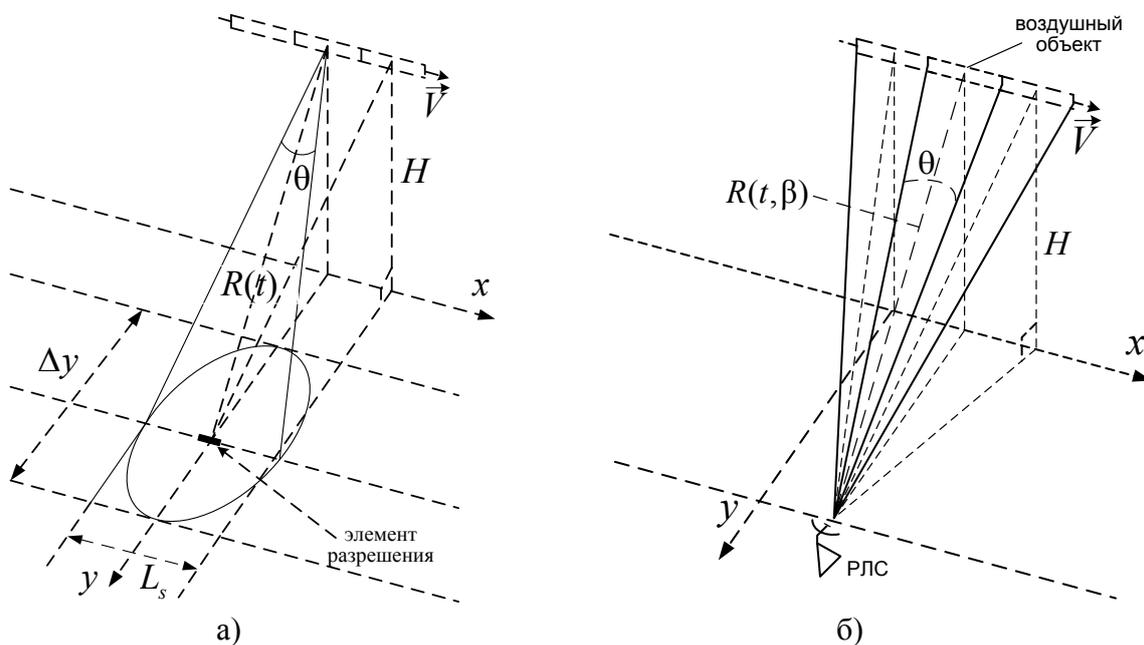


Рис. 1. Принцип синтеза апертуры:
а – прямой синтез апертуры; б – обратный синтез апертуры

Формирование РЛИ местности в полосе съемки Δy происходит за счет приема сигнала, отраженного от участка поверхности, расположенного в пределах диаграммы направленности реальной антенны. Процесс отражения зондирующего сигнала от облучаемой поверхности определяется функцией радиолокационного рельефа и диаграммой обратного рассеяния, характерными для каждого типа поверхности. При этом изменяется не только амплитуда импульса, но и начальная фаза и поляризация.

Получаемые РЛИ имеют ряд особенностей, определяемых спецификой отражения электромагнитных волн радиодиапазона на поверхности объектов сложной формы [2]. Эти особенности наглядно проявляются при сравнении изображений одного и того же участка местности в оптическом диапазоне и радиодиапазоне.

Так, например, на рис. 2, а представлено оптическое изображение участка местности, а на рис. 2, б этот же участок местности представлен в радиодиапазоне. Сравнивая изображения на рис. 2, можно сделать вывод о том, что РЛИ имеет более резкий динамический диапазон по сравнению с оптическим изображением, т. е. РЛИ имеет более высокий контраст по всему кадру изображения.

Видимые на РЛИ контрасты обусловлены уклонами рельефа, неровностями микрорельефа, диэлектрическими свойствами и структурой поверхности объектов.

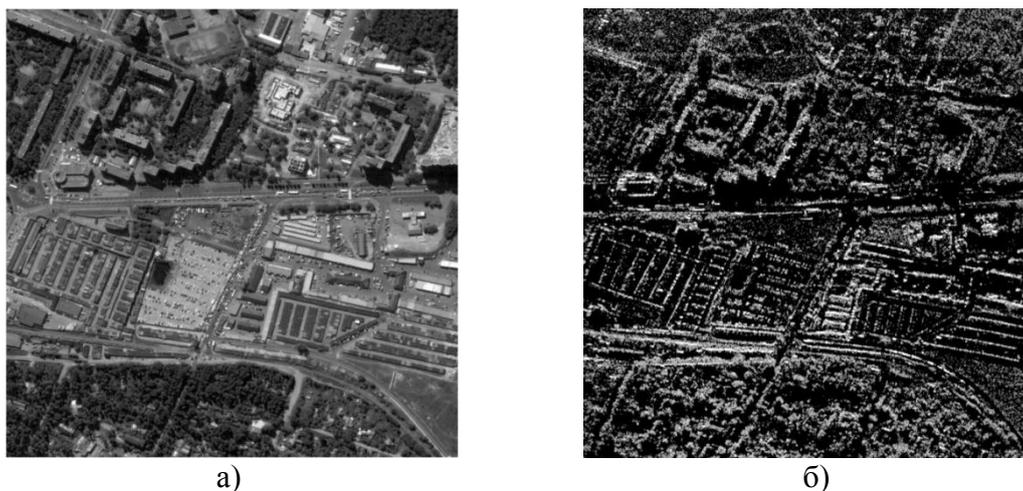


Рис. 2. Снимки участка местности в различных диапазонах:
а – оптическое изображение; б – радиолокационное изображение

Специфическая особенность радиолокационных изображений, полученных в РСА, заключается в наличии спекл-шума [3]. Принципиальным в образовании спекл-шума являются соотношение размеров объекта и величина разрешения, формируемого при когерентной обработке сигнала. Спекл-шум может использоваться для идентификации распределенных объектов и оценивания характеристик РСА, но в то же время наличие спекл-шума приводит к ухудшению дешифрируемости РЛИ, радиометрического разрешения и точности измерения компонентов радиолокационного портрета объектов.

В РСА используется широкий частотный спектр зондирующих сигналов. При этом информативность получаемых РЛИ сильно зависит от используемого частотного диапазона. Рассмотрим РЛИ на примере трех поддиапазонов работы РСА с длиной волны от единиц сантиметров до нескольких метров. Общие сведения о диапазонах работы РСА приведены в табл. 1 [4].

При использовании РСА с существенно различающейся длиной волны можно получать информацию о свойствах подстилающей поверхности с различных по глубине отражающих слоев. В соответствии с ограничениями на ширину спектра сигнала, определенными Регламентом радиосвязи, в X-диапазоне возможно получение субметрового разрешения, при котором формируемые радиолокационные изображения напоминают привычную для человека картину. Также данный диапазон характеризуется повышенным уровнем отраженных сигналов по сравнению с L- и P-диапазонами, что обеспечивает увеличение вероятности обнаружения малоразмерных целей на фоне местности и способствует ведению мониторинга [4]. Однако в этом диапазоне из-за большого затухания невозможно обнаружить замаскированные объекты.

Таблица 1

Общие сведения о диапазонах работы РСА

Диапазон радиоволн	Частота зондирующего сигнала, ГГц	Длина волны, См
P	0,432–0,438	70
L	1,215–1,300	23
S	3,1–3,3	10
C	5,25–5,57	5,6
X	9,3–9,8	3
Ku	13,4–13,75	2,2

Примеры изображений в L- и P-диапазонах представлены на рис. 3. На изображениях видно, что более коротковолновый L-диапазон имеет большее число отражающих элементов и, следовательно, более «пестрое» изображение. Более длинноволновый P-диапазон обладает лучшими проникающими свойствами, что позволяет вести наблюдение подстилающей поверхности с различных по глубине отражающих слоев. Однако визуально РЛИ содержит картину объектов, находящихся на земной поверхности, под земной поверхностью, в лесу и укрытиях, что делает картину трудно узнаваемой.

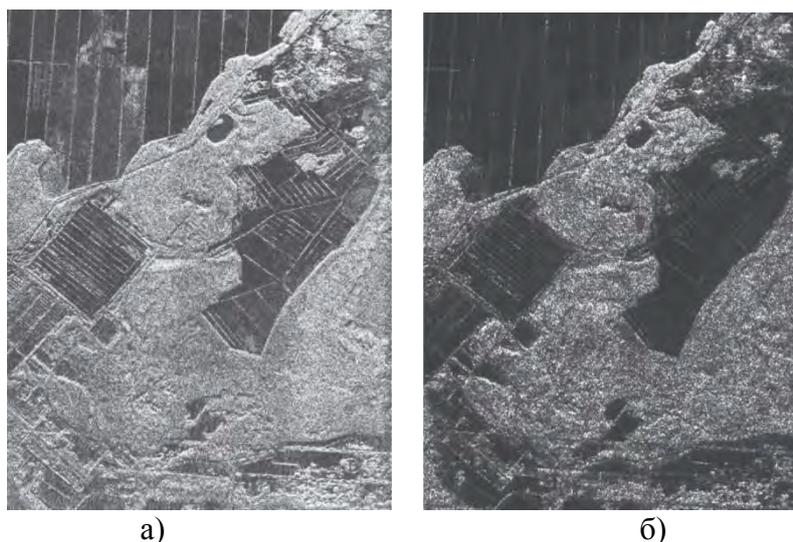


Рис. 3. Радиолокационные изображения в частотных диапазонах L(а) и P(б)

Важным свойством РСА, которое существенно влияет на получаемые изображения, является поляризация сигналов при передаче и приеме [3]. В однополяризационных РСА прием ведется с согласованными, вертикальной (VV) или горизонтальной (HH), поляризациями. В поляриметрических РСА используются по два передающих и приемных канала с горизонтальной и вертикальной поляризациями, которые позволяют сравнивать сигналы с любыми комбинациями поляризаций при передаче и приеме. Учет поляризации в обработке может предоставить дополнительную физическую информацию, непосредственно относящуюся к векторной природе отражения электромагнитных волн.

Радиолокационная съемка обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами оптико-электронными средствами наблюдения – датчиками видимого и инфракрасного диапазонов. Она позволяет получать изображения распределенных объектов с достаточно хорошим пространственным разрешением (сравнимым с оптическим) независимо от времени суток и освещенности, в любых метеорологических условиях, а применение многочастотных систем и систем с различной поляризацией обеспечивает получение изображений скрытых и

замаскированных объектов. Изображения таких объектов невозможно получить в оптическом или инфракрасном диапазонах. При радиолокационной съемке полученные геометрические характеристики объектов отличаются повышенной точностью измерения, появляется возможность трехмерного проектирования объектов и построения цифровой пространственной модели местности [3]. В условиях снижения оптической видимости и различной маскировки наблюдаемых объектов средства РСА являются единственным источником дистанционного получения информации об объектах, находящихся на земной поверхности.

Оптические наблюдения основаны на рассеянии солнечного излучения и регистрации его оптическими системами различного типа и разрешения по поверхности и электромагнитному спектру. Оптико-электронные системы (ОЭС) способны получать высокодетальные (с разрешением менее 0,5 м) оптические изображения объектов на поверхности Земли с высоты более 500 км. На снимках, сформированных оптико-электронными средствами, отображаются оптические характеристики объектов, их коэффициент спектральной яркости. Стандартными ограничениями на проведение оптических наблюдений являются уровень освещенности (безоблачная погода, светлое время суток) и повторяемость условий съемки, в связи с чем выбирают солнечно-синхронные орбиты космического аппарата-носителя. Оптические наблюдения, как правило, проводятся в панхроматическом, многоспектральном или гиперспектральном режимах, при этом спекл-шумы отсутствуют.

Оптические наблюдения осуществляются в надирной области съемки или вплоть до 45–50° по углу отклонения от надира. Вследствие этого на формируемых изображениях исключается искажающее влияние рельефа, которое проявляется в виде затенений рельефа. Разрешающая способность космических снимков ограничивается двумя факторами: дифракционным пределом, зависящим от апертуры (размера входного отверстия) оптической системы, а также искажениями из-за неоднородностей атмосферы. Оптические изображения имеют вид, привычный для человеческого глаза, их может понять и дешифровать неподготовленный пользователь. В результате многоспектральных оптических наблюдений можно построить спектральные кривые отражения для подстилающей поверхности, что полезно для классификации земных покровов. Вместе с тем слабое проникновение света в толщу исследуемых земных покровов ограничивает информацию об отражающем объекте, сводя ее к сведениям о тонком верхнем слое. Маскирующее влияние облачности, тумана и растительности серьезно сокращает возможности оптических наблюдений. Применение оптических наблюдений невозможно в высокоширотных районах в условиях полярной ночи.

Все вышеописанные рассуждения могут быть использованы и для решения задач инверсного синтезирования апертуры при дистанционном зондировании воздушных и космических объектов в АСОД ДЗРО, находящихся на земной поверхности, с целью мониторинга околоземного пространства. При этом условия формирования изображений распределенных объектов и параметры траекторного сигнала будут иметь свои особенности, что потребует модификации алгоритмов обработки информации и синтеза изображений. Для получения высокоинформативных изображений воздушных и космических объектов также целесообразно проведение процедуры комплексирования, и все сказанное выше не противоречит условиям задачи дистанционного зондирования с обратным синтезированием апертуры. Геометрия задачи зондирования воздушного (космического) объекта при обратном синтезе апертуры показана на рис. 1, б, на котором обозначены: \vec{V} – вектор путевой скорости объекта; x – проекция траектории на поверхность Земли (путевая дальность); y – дальность до объекта по поверхности Земли; $R(t, \beta)$ – текущая дальность до воздушного объекта в момент времени t ; H – высота полета; θ – ширина диаграммы направленности антенны РЛС при получении наблюдаемого объекта.

Таким образом, в результате сравнения оптических и радиолокационных изображений, формируемых в АСОД ДЗРО, можно определить ряд требований к исходным изображениям перед выполнением их совместной обработки:

- разрешения исходных изображений должны быть сходными;
- наиболее подходящими для совместной обработки с оптическими изображениями являются радиолокационные изображения в С-, Х-, Ku-диапазонах, так как они обладают достаточно высоким разрешением;
- РЛИ существенно отличаются от оптических изображений из-за наличия геометрических искажений, поэтому перед совместной обработкой необходимо выполнить ортотрансформирование исходных изображений, от качества выполнения которого существенно зависит результат комплексирования;
- целесообразно использование радиолокационных изображений, полученных на нескольких поляризациях HH, HV, VV, VH.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОГО И РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЙ

На практике изображения одного и того же объекта или участка местности, полученные в разное время или с помощью различных датчиков, могут значительно отличаться один от другого (иметь разное разрешение, разный динамический диапазон и т. д.). Чтобы увеличить вероятность надежного различения объектов и извлечь больше информации из совокупности полученных изображений, прибегают к процедуре их комплексирования. Комплексированием называется процесс объединения информации от двух или более изображений в одно, более информативное, чем любое из исходных изображений. Вследствие различия исходных радиолокационных и оптических изображений одной и той же сцены возникает необходимость решения ряда важных задач привязки, а также точной взаимной геометрической и амплитудной коррекции для их последующей совместной обработки.

Задачу комплексирования разбивают на три этапа: необходимую предварительную обработку, совместную обработку радиолокационных и оптических изображений и визуализацию полученного результата комплексирования [5]. Основные этапы совместной обработки оптических и радиолокационных изображений представлены на рис. 4.

Предварительная обработка изображений состоит из нескольких операций. Первая из них – радиометрическая и геометрическая калибровки.

Радиометрическая калибровка выполняется в целях коррекции искажений, вызванных разницей в чувствительности отдельных датчиков сканирующей системы. Иногда вводится поправка на изменения параметров среды во время зондирования (состояние атмосферы, изменение освещенности и т. п.).

В результате геометрической калибровки изменяют геометрию изображений либо корректируют геометрические искажения, вносимые аппаратурой дистанционного зондирования. Геометрические искажения возникают из-за ограниченности разрешения каждой системы дистанционного зондирования, вращения и кривизны Земли, колебаний высоты орбиты спутника, а также вследствие дефектов или погрешностей в системе регистрации данных. Для устранения геометрических искажений и приведения изображения к необходимой географической проекции его необходимо геометрически трансформировать, т. е. подвергнуть процедуре геометрической коррекции по данным, которые характеризуют положение датчика в пространстве в момент съемки и геометрию подстилающей поверхности.

Следующей выполняется операция улучшения качества изображений. В процессе формирования изображения, получаемые от различных датчиков, подвергаются искажениям, обусловленным как внешними факторами (влияние окружающей среды), так и несовершенством приемных устройств. В связи с этим возникает необходимость наилучшим образом выделить полезную информацию и максимально скомпенсировать воздействие искажений. На радиолокационном изображении необходимо провести подавление неизбежных спекл-шумов каким-либо из способов фильтрации.

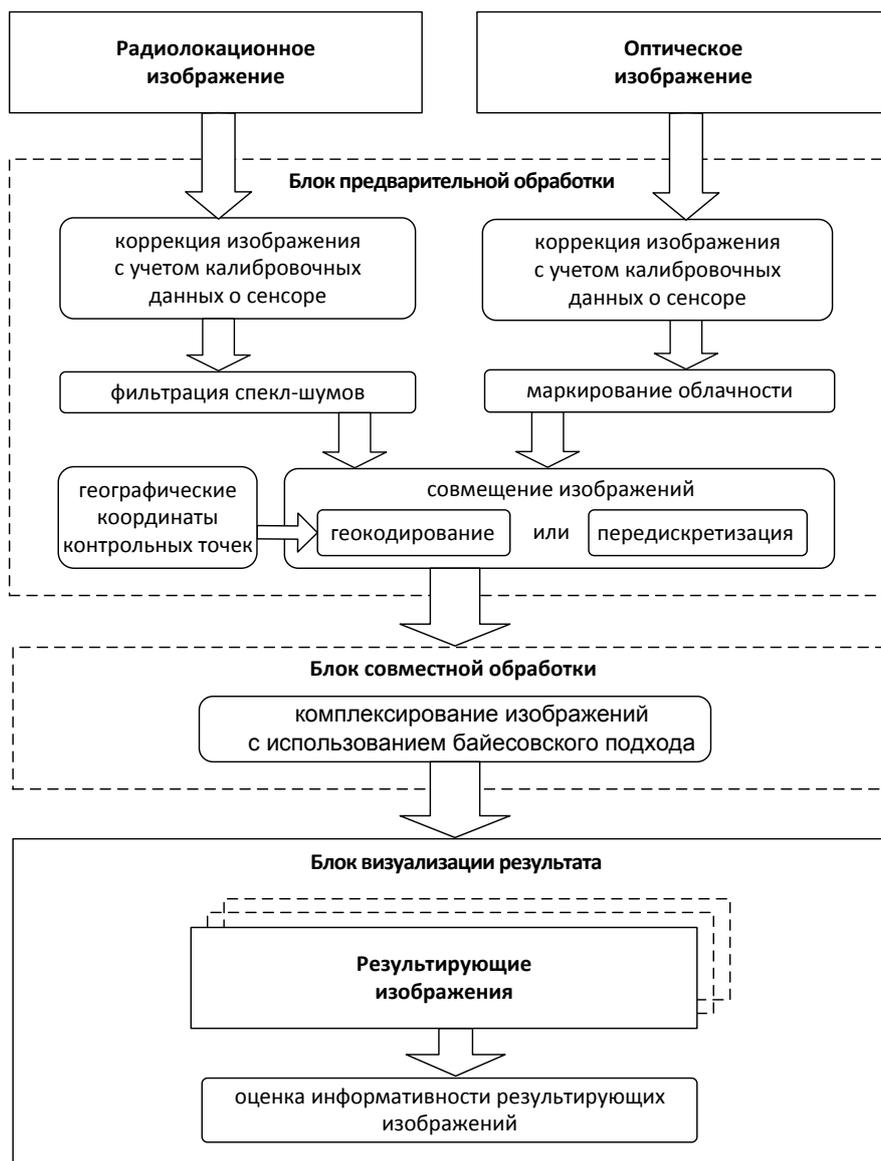


Рис. 4. Основные этапы комплексирования оптического и радиолокационного изображений

В случае наличия облачности на оптическом изображении желательно локализовать области отсутствия данных (вручную или одним из методов автоматической обработки). Затем изображения перестраивают к одинаковой пространственной сетке, как правило, одним из двух способов: геокодированием в какую-либо из географических проекций с привлечением дополнительных данных о координатах нескольких опорных точек или перестроением радиолокационного изображения к оптическому с возможным применением процесса ортотрансформирования, при котором необходимо учитывать цифровую модель рельефа. На радиолокационных снимках искажения обусловленные наличием рельефа, проявляются в изменении длин склонов в зависимости от угла визирования. Изображение при этом приводится из наклонной проекции в ортогональную. В случае сильно различающихся пространственных разрешений двух датчиков может понадобиться дополнительная фильтрация изображения низкого разрешения с целью избежать клеточного эффекта как на совмещенном изображении, так и на результате слияния.

После выполнения этапа предварительной обработки предстоит выбрать метод комплексирования изображений в зависимости от конкретной задачи.

Методы комплексирования разномасштабных изображений, полученных от оптических и радиолокационных датчиков, могут быть условно разбиты на три группы (рис. 5) в зависимости от информационного уровня, на котором происходит совместная обработка [5]:

- комплексирование на пиксельном (точечном) уровне;
- комплексирование на уровне объектов (характерных особенностей, черт);
- комплексирование на уровне принятия решений.

Каждый из указанных уровней характеризуется определенными способами обработки информации и необходимым объемом вычислений.

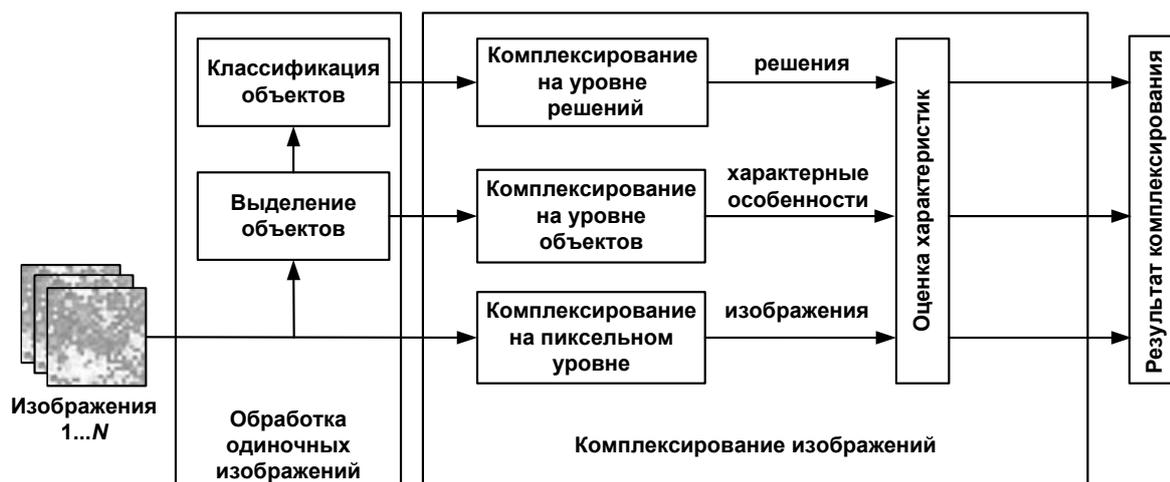


Рис. 5. Уровни комплексирования данных оптических и радиолокационных датчиков

Перед выполнением комплексирования разномасштабных изображений на пиксельном уровне выполняется обработка одиночных изображений, которая соответствует стандартному уровню 3А международной классификации уровней обработки и представления данных ДЗЗ из космоса (CEOS) [6]. Комплексирование на пиксельном (точечном) уровне подразумевает обработку самого низкого уровня с поэлементным объединением исходных изображений. Таким образом, в каждый элемент нового изображения закладывается информация от нескольких датчиков. Именно поэтому необходимо очень точно совмещать изображения, поскольку погрешности совмещения могут привести к ложной интерпретации и ошибочным результатам.

Перед выполнением комплексирования разномасштабных изображений на уровне объектов выполняется обработка одиночных изображений, которая соответствует стандартному уровню 1В международной классификации уровней обработки и представления данных ДЗЗ из космоса (CEOS) [6]. Комплексирование изображений на уровне объектов требует предварительного их выделения на исходных изображениях (процедура сегментации). В зависимости от типов решаемых задач такими объектами могут быть линейные структуры; границы; замкнутые кривые; области определенной геометрической формы, размера, типа отражения (рассеяния), текстуры и т. д. При помощи различных статистических методов, нейронных сетей и других алгоритмов изображения подвергаются дальнейшей обработке.

Перед выполнением комплексирования разномасштабных изображений на уровне решений выполняется обработка одиночных изображений, которая соответствует стандартному уровню 2А международной классификации уровней обработки и представления данных ДЗЗ из космоса (CEOS) [6]. К уровню решений относится группа методов, при использовании которых каждое изображение обрабатывают по отдельности, извлекают необходимую информацию. После этого результаты объединяют, применяя определенные правила принятия

решений для согласования результатов и определения степени достоверности полученных измерений при дальнейшей интерпретации.

Методы комплексирования на низшем уровне являются наиболее подходящими для применения общих методов совместной обработки многоканальных данных, тогда как при комплексировании на уровне объектов или решений подразумеваются конкретные особенности отдельно взятой задачи.

Среди методов комплексирования на пиксельном уровне для совместной обработки оптических и радиолокационных изображений в АСОД ДЗРО наиболее подходящими являются статистические методы, основанные на байесовском подходе, так как они учитывают статистические свойства исходных изображений и позволяют адаптивно оценить взаимосвязи между несколькими датчиками в целях получения результирующего изображения. Применение байесовских методов даст возможность значительно расширить круг практических задач, связанных с обработкой изображений, и получить оптимальные алгоритмы комплексирования, но их реализация потребует значительных вычислительных затрат.

Программная реализация алгоритмов статистической обработки в целях формирования изображений в АСОД ДЗРО и размещение многомерных массивов данных требуют высокопроизводительных вычислительных комплексов и значительных объемов оперативной памяти для организации вычислительного процесса.

За последние десять лет производительность современных ЭВМ выросла более чем в 1000 раз и продолжает прогрессировать, что позволяет выполнять необходимые операции в режиме, близком к режиму реального времени. Причем, как показывают исследования [7], алгоритмы статистической обработки изображений, основанные на байесовском подходе, обладают естественным параллелизмом и могут быть реализованы на вычислительных комплексах с параллельной архитектурой. Процесс микроминиатюризации вычислительных комплексов и создание специализированных вычислителей, способных за один такт осуществлять операции с массивами данных, способствуют реализации алгоритмов статистической обработки изображений непосредственно на борту воздушных (космических) аппаратов, при этом совершенствование алгоритмов не требует изменения аппаратных средств.

Если раньше вычислительные комплексы обладали оперативной памятью порядка нескольких Мегабайт, то сейчас современные многопроцессорные вычислительные комплексы оперируют терабайтами высокоскоростной оперативной памяти, что позволяет обрабатывать многомерные массивы данных, содержащие информацию об изображениях, формируемых оптическими и радиолокационными датчиками.

Из вышеизложенного следует, что совершенствование информационных технологий и эволюция современных вычислительных комплексов позволят реализовать алгоритмы статистической обработки изображений в АСОД ДЗРО в режиме реального времени.

По завершению процедуры комплексирования необходимо представить результаты обработки в удобном для визуального восприятия виде, позволяющем оператору принять решение по результирующим изображениям.

Следует отметить, что задача оценки качества комбинированных изображений, как результата комплексирования в АСОД ДЗРО, является самостоятельной научной задачей. Одним из основных критериев оценки качества таких изображений является их информативность. Она определяет объем полезной информации, содержащейся в изображениях, который характеризуется с точки зрения ее полезности и воспринимаемости. Существующие подходы к оценке информативности результирующих изображений АСОД ДЗРО малопригодны вследствие их недостаточной универсальности. Оценка информативности результирующих изображений является нетривиальной задачей, требующей дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, совместная обработка оптических и радиолокационных изображений в АСОД ДЗРО позволит существенно повысить информативность исходных цифровых изображений, а также улучшить возможности их интерпретации, т. е. в конечном счете повысить достоверность решения задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов. Наиболее подходящими методами комплексирования оптических и радиолокационных изображений являются методы, основанные на байесовском подходе, так как они учитывают статистические свойства исходных изображений и позволяют адаптивно оценить взаимосвязи между несколькими датчиками, однако их реализация требует значительных вычислительных затрат. Реализация алгоритмов совместной обработки оптических и радиолокационных изображений возможна на современных вычислительных комплексах с параллельной архитектурой в режиме реального времени.

Список используемых источников

1. *Фалькович С.Е., Пономарев В.И., Шкварко Ю.В.* Оптимальный прием пространственно-временных сигналов в радиоканалах с рассеянием. – М.: Радио и связь, 1989. – 296 с.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов, А.Н. Детков и др. – М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
3. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Науч. сер. Системы мониторинга воздушного космического пространства и земной поверхности / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
4. *Костров В.В., Толстов Е.Ф.* Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // Сборник трудов конференции «VII Всероссийские армандовские чтения: молодая школа», Муром, 27–29 июня 2017 г. – 2017. – С. 76–113.
5. Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения и перспективы / Л.Н. Захарова, А.И. Захаров, М.В. Сорочинский и др. // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, № 1. – С. 5–19.
6. *Беленов А.В.* Стандартные уровни обработки и форматы представления данных ДЗЗ из космоса. Мировой опыт // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 18–20.
7. *Коренной А.В., Лепешкин С.А., Кадочников А.П.* Оптимальное восстановление изображений в системах радиовидения воздушно-космического базирования в телескопическом режиме // Научные технологии. – 2015. – Т. 16, № 4. – С. 80–84.

А.М. Гончаров,
кандидат техн. наук;
А.А. Шульгин,
кандидат техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ

Обосновано построение модели уровня сформированности профессиональных компетенций для адаптивной системы обучения специалистов автоматизированных систем военного и двойного назначения с учетом стохастичности процесса изменения уровня сформированности профессиональных компетенций. Показано, что применение статистических методов теории оптимальной фильтрации случайных процессов позволяет оценить уровень сформированности профессиональных компетенций, а применение методов теории систем со случайной скачкообразной структурой представляет возможность успешно сочетать автоматизированное управление процессом обучения с экспертными корректировками данного процесса преподавателем.

Ключевые слова: уровень сформированности профессиональной компетенции, адаптивная система обучения, модель изменения уровня сформированности профессиональной компетенции.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях в ходе подготовки военнослужащих к выполнению задач по предназначению стали широко применяться информационные технологии обучения как при обучении специалистов в военных учебных заведениях, так и в ходе боевой подготовки в частях. Повышение эффективности информационных технологий обучения связано с развитием и применением методов и средств построения информационно-образовательных систем на основе адаптивных алгоритмов управления обучением и контроля уровня подготовки. Подобные алгоритмы используют принцип обратной связи, и их возможности определяются составом параметров, доступных для измерения во время обучения и контроля. Обратная связь, как правило, строится по результатам анализа усвоения учебного материала обучающимся. Одним из традиционных направлений компьютеризации данного процесса является создание адаптивных систем обучения. При построении измерительных систем, применяемых в адаптивных системах обучения, используют подходы, применяемые при решении задач теории адаптивной фильтрации. В этом случае используются два основных подхода. Первый из них (байесовский) учитывает возможность того, что принятая модель не корректна. В такую модель включается специальный источник оценивания состоятельности выбранной модели, что позволяет уменьшить среднеквадратическое значение ошибок результирующей оценки измеряемого параметра. Второй подход является субоптимальным и основан на идее коррекции параметров фильтра.

Еще одним направлением, реализующим адаптивный подход к построению измерительных систем, является теория систем со случайной скачкообразной структурой (ССС) [9–14]. Процессы и системы со случайной структурой в настоящее время получили широкое распространение в технике. Под системами СССР понимаются наблюдаемые и управляемые в дискретные моменты времени стохастические динамические системы, структура которых имеет конечное число возможных состояний, сменяющих друг друга в случайные моменты времени [14].

Степень подготовки военных специалистов в сложившейся системе обучения удобно определять с помощью профессиональной компетентности как интегрального свойства – совокупности наиболее стойких особенностей офицера-профессионала, постоянно реализуе-

мых и обеспечивающих определенный качественно-количественный уровень профессиональной деятельности, характерный для конкретного специалиста [1].

Планирование учебного процесса и контроля компетентности можно автоматизировать в той или иной степени, заложив в конструкцию адаптивной системы обучения (АСО) элементы теории оценки компетентности и теории управления объектом и его параметрами. В данном случае в качестве объекта будет выступать обучающийся, в роли основного параметра, подлежащего контролю, – компетентность. Управление процессом обучения, приведения профессиональной компетентности к установленным требованиям можно возложить на АСО.

Важной характеристикой АСО является качество ее взаимодействия с конкретным обучающимся. При определении этого взаимодействия необходимо учитывать как predetermined параметры адаптации (предпочтительный стиль обучения, выбранную предметную область), так и динамически изменяющиеся в процессе обучения (текущие цели и уровень сформированности профессиональных компетенций как составляющих профессиональной компетентности). Вся необходимая информация о параметрах адаптации хранится в модели обучающегося.

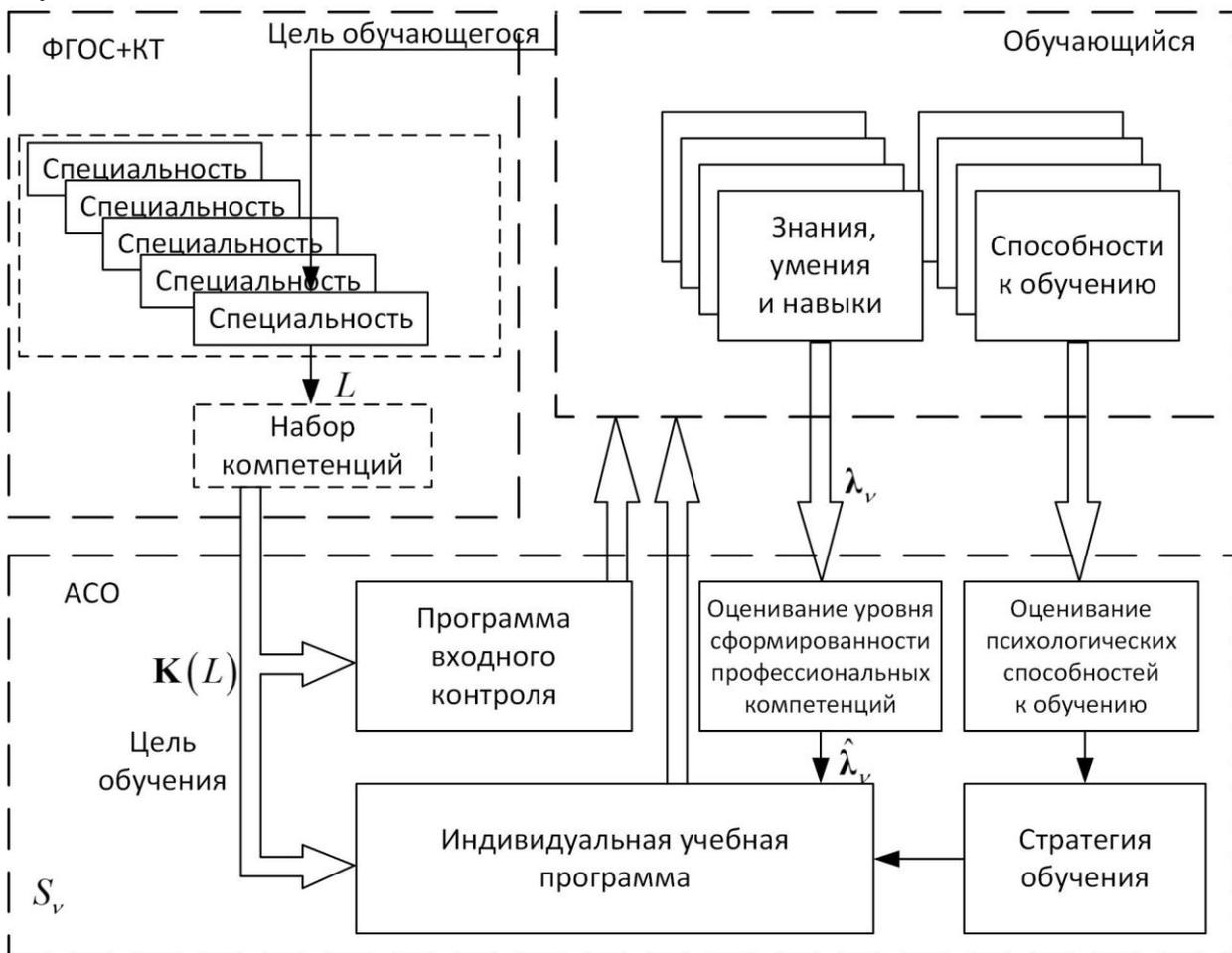


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия адаптивной системы обучения с обучающимся

В данном исследовании под моделью обучающегося понимаются совокупность характеристик обучающегося, контролируемых при взаимодействии адаптивной системы обучения с обучающимся и определяющих качество усвоения материала по изучаемому предмету или специальности в целом, а также методы (правила) оценивания этой совокупности и управле-

ния ее состоянием. В первую очередь эти правила должны вызывать изменения состояния самой модели обучающегося по результатам его работы с системой.

Модель обучающегося должна включать в себя информацию:

- о цели обучения (наборе компетенций);
- об уровне сформированности профессиональных компетенций (УСПК);
- об особенностях представления учебных материалов обучающемуся с учетом выбранных форм методов и приемов обучения, выбора способов и методов контроля УСПК (стратегии обучения) на основании оценки результатов входного контроля.

Основные компоненты модели представлены на рис. 1. Здесь в качестве цели обучения выступает освоение набора компетенций $K(L)$ для выбранной специальности L .

В процессе обучения АСО активно влияет на модель обучающегося, постоянно корректируя ее параметры, а также на их основе меняя свою структуру S , адаптирует процесс обучения, делая его максимально эффективным для каждого обучающегося.

При использовании указанной схемы взаимодействия АСО с моделью обучающегося цель обучения и психологические способности к обучению не изменяются за время, отводимое на обучение, поэтому влияние данных составляющих в данной работе рассматривать не будем.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ В КЛАССЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Адаптивная система обучения предполагает итерационный подход к процессу обучения, т. е. в процессе обучения обучающийся проходит многочисленные этапы. По завершении каждого этапа происходят оценка достигнутых целей обучения и корректировка параметров модели УСПК, которые будут учтены в очередном этапе, и т. д.

В современной теории синтеза систем применяются различные способы их математического описания. Линейные стационарные системы описываются с помощью передаточных функций и частотных характеристик, нелинейные и линейные нестационарные системы – с помощью дифференциальных или разностных уравнений в форме Коши, т. е. разрешенных относительно первых производных или разностей [6, 7].

Последний способ представляет собой математическое описание системы в пространстве состояний. В настоящее время он более востребован ввиду универсальности описания систем различного назначения и удобства представления на ЭВМ [8].

Рассматривая обучающегося как систему, усваивающую некоторый объем учебного материала, можно считать, что состояние данной системы изменяется в дискретные моменты времени Δ_i (рис. 2), контроль состояния осуществляется в моменты $t_v = t_{v-1} + e_v \Delta$, $e = N(1, E)$, определяемые этапами контроля полученных знаний, где E – максимальное значение отсчетов дискретизации по времени $\Delta = T/n$ между этапами контроля (n – общее количество отсчетов дискретизации); v – номер шага контроля, $v = N(0, m)$ (m – количество этапов контроля знаний). В этом случае можно рассматривать обучающегося как дискретную систему, имеющую определенный набор состояний. Оценку уровня сформированности профессиональных компетенций обеспечивает система оценки УСПК – система контроля знаний, по сути, дискретная измерительная система, работающая совместно с устройством обработки измерений.

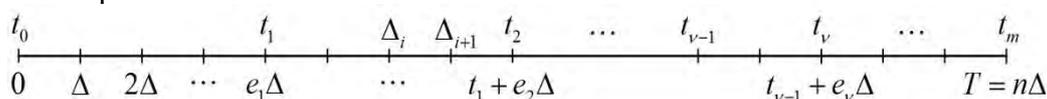


Рис. 2. Временная шкала процесса обучения с этапами контроля

В пространстве состояний математическую модель любой дискретной измерительной системы можно описать разностными уравнениями. Применительно к процессу обучения можно записать:

$$\lambda_v = \mathbf{h}(\lambda_{v-1}, t_v) + \mathbf{n}_{0v}; \quad (1)$$

$$\xi_v = \mathbf{g}(\lambda_v, t_v) + \mathbf{n}_{\xi v}, \quad (2)$$

где λ_v – k -мерный вектор параметров УСПК по изучаемой дисциплине с вектором неопределенности \mathbf{n}_{0v} в виде центрированного дискретного белого гауссовского шума с матрицей дисперсий \mathbf{D}_λ ;

$\mathbf{h}(\cdot)$ – в общем случае нелинейная вектор-функция, характеризующая изменение λ_v во времени;

ξ_v – l -мерный вектор измерений параметров УСПК, наблюдаемых на данном этапе контроля с вектором центрированных дискретных белых гауссовских шумов ошибок измерений $\mathbf{n}_{\xi v}$, вызванных неидеальностью системы измерения (имеются субъективные погрешности, ошибочные критерии, неполнота контроля) с матрицей дисперсий \mathbf{D}_ξ ;

\mathbf{g} – матрица измерений, формирующая программу измерений УСПК во времени.

Вид компонентов вектор-функции $\mathbf{h}(\cdot)$ определяется на начальном этапе с помощью методов оценивания психологических особенностей обучающегося.

Выражения (1) и (2) являются соответственно математическими моделями УСПК и измерений УСПК.

На рис. 3 представлена обобщенная структура системы оценки УСПК где обозначены: ОН – объект наблюдения; СК – система контроля – совокупность тестовых заданий и алгоритмов обработки, формирующей наблюдаемый процесс ξ_v ; УО – устройство обработки; $\hat{\lambda}_v$ – k -мерный вектор оценок УСПК λ_v .

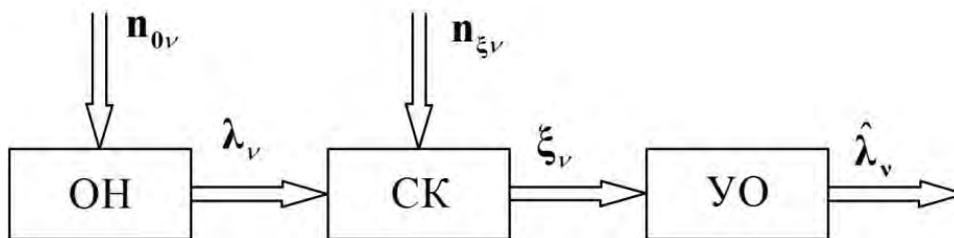


Рис. 3. Структура системы оценки уровня сформированности профессиональных компетенций

Состояния параметров УСПК являются случайными процессами, поэтому для синтеза адаптивной системы обучения целесообразно применить статистические методы теории оптимальной фильтрации случайных процессов.

При синтезе дискретных измерительных систем уравнения состояния и наблюдения можно представить в виде:

$$\lambda_v = \mathbf{A}(\lambda_{v-1}, t_v) + \mathbf{n}_{0v}; \quad (3)$$

$$\xi_v = \mathbf{H}(\lambda_v, t_v) + \mathbf{n}_{\xi v}, \quad (4)$$

где $\mathbf{A}(\cdot)$ и $\mathbf{H}(\cdot)$ – переходные матрицы векторов λ_v и ξ_v .

ОЦЕНИВАНИЕ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ

Для нахождения оценок $\hat{\lambda}_v$ случайного процесса λ_v при наблюдении ξ_v достаточно знать апостериорную плотность вероятности $p(\lambda_v/\xi_0^v)$ для момента t_v . Здесь ξ_0^v означает последовательность наблюдений $\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_v$ для моментов времени t_0, t_1, \dots, t_v .

При известной плотности вероятности $p(\lambda_{v-1}/\xi_0^{v-1})$ выражение $p(\lambda_v/\xi_0^v)$ примет вид

$$p(\lambda_v/\xi_0^v) = cp(\lambda_v/\xi_0^{v-1})p(\xi_v/\lambda_v), \tag{5}$$

где $c = p^{-1}(\xi_v/\xi_0^{v-1})$; $p(\xi_v/\lambda_v)$ – текущее значение функции правдоподобия, находится из уравнения наблюдения (4).

Условная плотность вероятности экстраполированного значения λ_v в отсутствие наблюдения ξ_v определяется по формуле

$$p(\lambda_v/\xi_0^{v-1}) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\lambda_{v-1}/\xi_0^{v-1})p(\lambda_v/\lambda_{v-1})d\lambda_{v-1}. \tag{6}$$

В выражении (6) $p(\lambda_{v-1}/\xi_0^{v-1})$ предполагалась известной, а $p(\lambda_v/\lambda_{v-1})$ находится из уравнения состояния (3).

Формулы (5) и (6) позволяют рекуррентно вычислять апостериорную плотность вероятности $p(\lambda_v/\xi_0^v)$ процесса при известном начальном распределении $p_{pr}(\lambda_0)$ и в соответствии с выражением

$$\hat{\lambda}_{i,v} = \underbrace{\int \dots \int}_n \lambda_{i,v} p(\lambda_v/\xi_0^v) d\lambda_v \tag{7}$$

получать оценки $\hat{\lambda}_{i,v} \in \hat{\lambda}_v$.

При решении задачи определения вектора оценок $\hat{\lambda}_v$ уровня УСПК λ_v уравнения (3), (4) можно считать изменяющимися по линейному закону. В этом случае они примут вид:

$$\lambda_v = \mathbf{A}_{v-1}\lambda_{v-1} + \mathbf{n}_{\lambda v}; \tag{8}$$

$$\xi_v = \mathbf{H}_v\lambda_v + \mathbf{n}_{\xi v}. \tag{9}$$

При выполнении условий (8), (9) общее решение уравнения (6) описывается гауссовской функцией

$$p(\lambda_v/\xi_0^v) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}(\det \mathbf{R}_v)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\xi_v - \mathbf{H}_v\hat{\lambda}_v)^T \mathbf{R}_v^{-1}(\xi_v - \mathbf{H}_v\hat{\lambda}_v)\right\}, \tag{10}$$

эволюции характеристик $\hat{\lambda}_v$ и $\hat{\mathbf{R}}_v$ описываются выражениями [3,4]:

$$\hat{\lambda}_v = \tilde{\lambda}_v + \hat{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}_v^T \mathbf{R}_{\xi v}^{-1} [\xi_v - \mathbf{H}_v \tilde{\lambda}_v]; \tag{11}$$

$$\hat{\mathbf{R}}_v = \tilde{\mathbf{R}}_v - \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}_v^T \mathbf{R}_{\xi v}^{-1} \mathbf{H}_v \tilde{\mathbf{R}}_v; \tag{12}$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_v = \mathbf{A}_{v-1} \hat{\mathbf{R}}_v \mathbf{A}_{v-1}^T + \mathbf{R}_{\lambda v}; \tag{13}$$

$$\tilde{\lambda}_v = \mathbf{A}_{v-1} \hat{\lambda}_{v-1}, \tag{14}$$

где $\hat{\lambda}$ и $\tilde{\lambda}$ – векторы апостериорной и априорной оценок УСПК с соответствующими матрицами ковариации ошибок $\hat{\mathbf{R}}$ и $\tilde{\mathbf{R}}$.

Уравнения (11)–(14) описывают оптимальный линейный фильтр (который в литературе получил название фильтр Калмана [5]), представляющий собой нестационарную динамическую систему.

Основным недостатком алгоритмов обработки информации на основе методов теории оптимальной линейной фильтрации является гипотеза о точном соответствии моделей динамики уровня сформированности профессиональных компетенций и измеренного уровня профессиональных компетенций реальному уровню. Однако на практике столь полными знаниями о модели располагают довольно редко. Реально имеются лишь экспертные оценки (с некоторой неопределенностью). Кроме того, линейная модель часто является лишь приближенным описанием реальных динамических систем.

В условиях ошибочных экспертных оценок статистическая неопределенность резко увеличивается, что приводит к отсутствию точной априорной информации о законах распределения и спектральных плотностях возмущений, сопровождающих оцениваемые процессы и наблюдения. Источниками неопределенности также являются ложные сигналы в СК, вызванные формальным подходом обучающегося к тестированию.

В результате возникают задачи определения оптимальных параметров математических моделей контролируемых систем, способов обработки информации и различия истинных и помеховых траекторий в СК. Эти задачи находятся на «стыке» теории статистических решений и теории оценивания.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ В КЛАССЕ СИСТЕМ СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРЫ

Специфика профессиональной деятельности специалистов Космических войск предполагает владение не только специальными знаниями, но и психолого-педагогическими знаниями, необходимыми для организации и эффективного взаимодействия в процессе служебной деятельности [1]. Адаптивная система обучения должна предусматривать среди прочих факторов и влияние особенностей подготовки специалистов, связанных с военной службой. Эти факторы вносят дополнительную неопределенность в процесс обучения.

Решение задачи синтеза систем контроля (алгоритмов обработки информации) в условиях априорной неопределенности осуществляется методами теории адаптивной фильтрации [6]. Данная теория определяет пути построения измерительных систем, учитывающих в своей структуре свойство адаптивности. Параметры таких систем корректируются в соответствии с входными данными по определенному закону.

Важной особенностью систем ССС является двойственный характер векторов состояния объекта и наблюдения. Это накладывает существенный отпечаток на постановку задач обработки информации. В результате в ССС необходимо решать задачи распознавания структуры системы и оценивания фазовых координат наблюдаемого процесса, а также совместного управления структурой и каналом наблюдения.

Достаточно общая математическая модель измерителя со случайной структурой может быть описана выражением [14]

$$\xi_v = \mathbf{H}(s_v, \lambda_v) + \mathbf{n}_\xi(s_v), \quad (15)$$

где s_v – номер (индекс) структуры $s_v = \overline{1, S}$;

$\mathbf{H}(s_v, \lambda_v)$ – матрица измерений в s -й структуре;

$\mathbf{n}_\xi(s_v)$ – вектор шумов ошибок измерений УСПК в s -й структуре.

Математическая модель УСПК принимает вид

$$\lambda_v = \mathbf{A}(s_v, s_{v-1}, \lambda_{v-1}) + \mathbf{n}_{0,v}(s_v), \quad (16)$$

где $\mathbf{A}(s_v, s_{v-1}, \lambda_{v-1})$ – заданная матрица;

$\mathbf{n}_{0,v}(s_v)$ – вектор случайных возмущений.

Процесс смены структуры в общем виде описывается условной марковской цепью с вероятностями перехода системы из одного состояния в другое

$$q_v(s_v | \lambda_{v-1}, s_{v-1}), \tag{17}$$

где $q_v(\cdot)$ – условная вероятность перехода системы из состояния s_{v-1} в состояние s_v .

Математическая модель индикатора сопутствующего признака описывается условной марковской цепью на два состояния

$$\pi(r_v | \lambda_{v-1}, s_{v-1}), \tag{18}$$

где r_v – состояние индикатора в момент времени t_v .

Обработка информации в ССС заключается в нахождении апостериорного распределения вектора состояния $p_v(\lambda_v, s_v | \xi_0^v, \mathbf{r}_0^v)$ объекта $[\lambda_v, s_v]$ и его компонент λ_v и s_v в момент времени t_v , основанном на наблюдениях измерителей ξ_0^v и индикаторов $r_0^v = r_0, r_1, \dots, r_v$ на интервале времени $[0, T]$ [9].

Знание закона распределения $[\lambda_v, s_v]^T$ позволяет определить оценки вектора УСПК $\hat{\lambda}_v(\xi_0^v, \mathbf{r}_0^v)$, а также вероятности и оценки состояния системы $\hat{P}_v(s_v | \xi_0^v, \mathbf{r}_0^v)$, $\hat{s}_v(\xi_0^v, \mathbf{r}_0^v)$.

Оптимальный рекуррентный алгоритм для апостериорной плотности вероятности $p(\lambda_v, s_v | \xi_v)$ вектора $[\lambda_v, s_v]^T$, основанный на наблюдениях измерителя и индикаторов сопутствующих признаков, описывается уравнениями [12, 13]:

$$\hat{p}(\lambda_v, s_v | \xi_v) = \frac{\tilde{p}(\lambda_v, s_v) \mathbf{\Pi}(r_v | \lambda_v, s_v) p(\xi_v | \lambda_v, s_v)}{\sum_{s_v} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}(\lambda_v, s_v) \mathbf{\Pi}(r_v | \lambda_v, s_v) p(\xi_v | \lambda_v, s_v) d\lambda_v}; \tag{19}$$

$$\mathbf{\Pi}(r_v | \lambda_v, s_v) = \prod_{i=1}^l \pi_i(r_v | \lambda_v, s_v), \quad s_v = N(1, n), \quad v = N(0, m), \tag{20}$$

с начальными условиями

$$\hat{p}(\lambda_0, S_0) = \tilde{p}(\lambda_0, S_0),$$

где $\hat{p}(\lambda_v, s_v | \xi_v)$ – оценка апостериорной плотности вероятности вектора $[\lambda_v, s_v]^T$;

$\tilde{p}(\lambda_v, s_v)$ – априорная плотность вероятности;

$p(\xi_v | \lambda_v, s_v)$ – условная плотность вероятности ξ_v при фиксированных λ_v и s_v .

Зная $\hat{p}(\lambda_v, s_v)$, можно найти условные и результирующие распределения вектора λ_v и структуры s_v , их оценки и ковариации ошибок оценивания вектора λ_v в момент времени t_v [12]:

$$\hat{P}(s_v) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(\lambda_v, s_v) d\lambda_v; \tag{21}$$

$$\hat{p}(\lambda_v | s_v) = \hat{p}^{-1}(s_v) \hat{p}(\lambda_v, s_v); \tag{22}$$

$$\hat{\lambda}(s_v) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda_v \hat{p}(\lambda_v | s_v) d\lambda_v; \tag{23}$$

$$\hat{\mathbf{R}}(s_v) = \int_{-\infty}^{\infty} [\lambda_v - \hat{\lambda}(s_v)] [\lambda_v - \hat{\lambda}(s_v)]^T \hat{p}(\lambda_v | s_v) d\lambda_v; \tag{24}$$

$$\hat{p}(\lambda_v) = \sum_{s_v} \hat{p}(\lambda_v, s_v); \quad (25)$$

$$\hat{\lambda}_v = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda_v p(\lambda_v) d\lambda_v = \sum_{s_v} \hat{\lambda}(s_v) \hat{p}(s_v); \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_v = \int_{-\infty}^{\infty} [\lambda_v - \hat{\lambda}_v][\lambda_v - \hat{\lambda}_v]^T \hat{p}(\lambda_v) d\lambda_v = \sum_{s_v} [\hat{\mathbf{R}}(s_v) + \hat{\lambda}(s_v)\hat{\lambda}^T(s_v)]\hat{p}(s_v) - \hat{\lambda}_v\hat{\lambda}_v^T, \quad (27)$$

где $\hat{P}(s_v)$ – апостериорная вероятность s -го состояния (структуры);
 $\hat{p}(\lambda_v | s_v)$, $\hat{\lambda}(s_v)$, $\hat{\mathbf{R}}(s_v)$ – условные при фиксированном s -м состоянии структуры;
 $\hat{p}(\lambda_v)$, $\hat{\lambda}_v$, $\hat{\mathbf{R}}_v$ – безусловные соответственно плотность вероятности, оценка и ковариация ошибки оценивания вектора λ_v .

Оценка состояния структуры системы осуществляется по критерию максимума апостериорной вероятности [14]

$$\hat{s}_v = \arg \max \hat{P}(s_v). \quad (28)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

В современной литературе по моделированию обучения [2] указывается, что процесс формирования знаний, навыков и умений имеет экспоненциальную зависимость от времени

$$\lambda(t) = \lambda_c - (\lambda_c - \lambda_n) \cdot e^{-\alpha t}, \quad (29)$$

где λ_n и λ_c – соответственно начальный и стационарный уровень сформированности профессиональных компетенций;

α – коэффициент скорости формирования профессиональной компетенции.

Выражению (29) соответствует график идеального изменения УСПК (рис. 4) при нулевом начальном значении $\lambda_n = 0$.

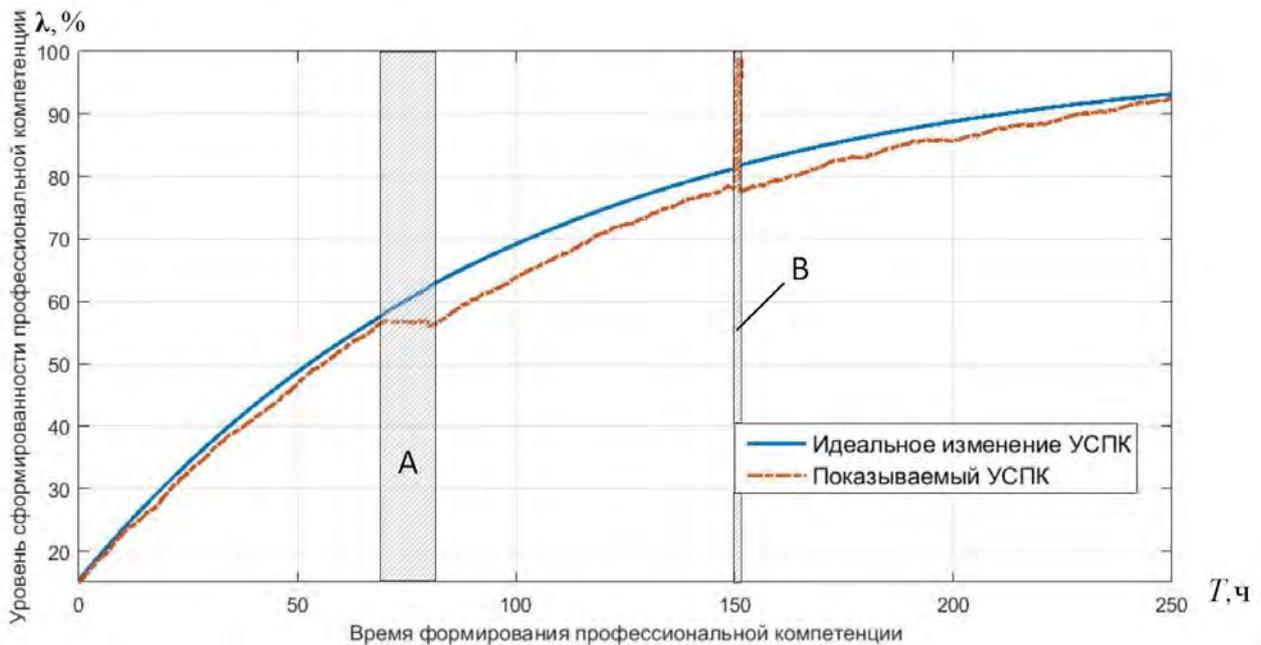


Рис. 4. Графики изменения уровня сформированности профессиональной компетенции

В ходе обучения УСПК изменяется неравномерно. Возможны периоды, когда обучающийся не усваивает знания (область *A* на рис. 4), или когда обучающийся показывает максимальные знания (область *B* на рис. 4). В этом случае показываемый УСПК будет соответствовать второй кривой (рис. 4).

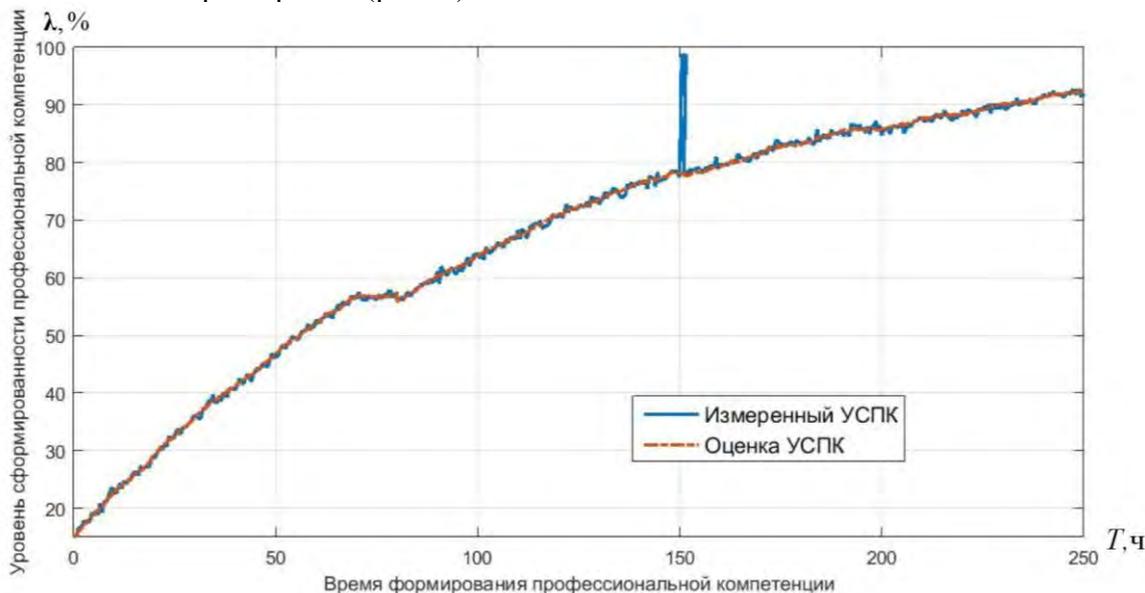


Рис. 5. Фрагмент графика измерения уровня сформированности профессиональной компетенции и его оценки

С помощью измерителя, построенного в соответствии с выражением (15), получают данные об измеренном УСПК (рис. 5). Далее на основании использования индикаторов сопутствующих признаков, построенных по выражению (18), обнаруживаются нарушения в нормальном процессе формирования профессиональных компетенций. При этом АСО в соответствии с выражением (28) переводится в соответствующую структуру, оценивается истинный УСПК. Далее с учетом оцененного УСПК возможна автоматическая корректировка плана обучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенной модели и построение АСО в классе систем со случайной структурой позволит автоматизировать процесс контроля компетентности специалистов.

Применяя различные индикаторы качества процесса обучения и уровня сформированности профессиональных компетенций, можно существенно повысить эффективность процесса обучения, сократив время обучения за счет контроля реального уровня сформированности профессиональных компетенций, что, в свою очередь, позволит вносить корректировки в учебную программу контролируемого обучающегося, тем самым подстраивая систему под индивидуальные особенности обучающегося.

Список используемых источников

1. Кунтурова Н.Б. Квалиметрия профессиональной компетентности в системе непрерывной подготовки и распределения офицерских кадров Космических войск: моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 368 с.

2. *Майер Р.В.* Кибернетическая педагогика: имитационное моделирование процесса обучения. – Глазов: ГГПИ, 2014. – 141 с.
3. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
4. *Сейдж Э.П., Уйт Ч.С.* Оптимальное управление системами. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
5. *Максимов М.В., Меркулов В.И.* Радиоэлектронные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
6. *Александров А.Г.* Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высш. шк., 1989. – 264 с.
7. *Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Канащенков А.И.* Авиационные системы радиоуправления: в 3 т. – М.: Радиотехника, 2003. – Т. 1: Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. – 192 с.
8. *Казаков И.Е., Мальчиков С.В.* Анализ стохастических систем в пространстве состояний. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
9. *Бухалев В.А.* Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 288 с.
10. *Бухалев В.А.* Рекуррентные алгоритмы распознавания и оценивания состояния динамических систем по информации от измерителей и индикаторов. Наблюдение без запаздывания // Изв. РАН. Техн. кибернетика. – 1992. – №1. – С. 148–157.
11. *Бухалев В.А.* Фильтрация марковского процесса, наблюдаемого в совокупности со скачкообразной помехой // Изв. РАН. Техн. кибернетика. – 1992. – № 2. – С. 136–144.
12. *Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А.* Анализ систем случайной структуры. – М.: Наука, 1993. – 272 с.
13. *Казаков И.Е., Мальчиков С.В.* Анализ стохастических систем в пространстве состояний. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
14. *Казаков И.Е., Артемьев В.М.* Оптимизация динамических систем случайной структуры. – М.: Наука, 1980. – 382 с.

С.А. Лепешкин,

кандидат техн. наук, доцент

А.С. Логовский,

кандидат физико-мат. наук

АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», г. Москва;

В.Я. Пророк,

доктор техн. наук, профессор;

Д.А. Харебин

АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», г. Москва;

ПОСТРОЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА БАЗЕ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СТАНЦИЙ ДАЛЬНЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ

В статье сформулирована цель применения учебно-тренировочных средств (УТС) современных высокотехнологичных радиоэлектронных станций дальнего обнаружения (РЭС ДО) в процессе подготовки личного состава войсковых частей, эксплуатирующих РЭС ДО, – обеспечение требуемого уровня готовности военных специалистов к несению дежурства в различных условиях внешней обстановки.

Проведены анализ и сравнение эффективности применения основных подходов по уровню автоматизации процесса подготовки военных специалистов РЭС ДО. Сделан вывод о необходимости построения и применения автоматизированной информационно-образовательной среды для повышения качества подготовки военных специалистов РЭС ДО. Подчеркнута взаимосвязь между повышением уровня подготовки и понижением процента отказов по вине человеческого фактора, сокращением времени восстановления работоспособности аппаратно-программных средств. Приведена структура УТС РЭС ДО. Показаны пути построения современной автоматизированной информационно-образовательной среды на базе УТС РЭС ДО. Рассмотрены основные тенденции развития перспективных автоматизированных информационно-обучающих систем.

Сделан вывод о возможности развертывания и применения автоматизированной информационно-образовательной среды УТС РЭС ДО в профильных высших военных учебных заведениях в целях повышения уровня профессиональной адаптации выпускников специализированных кафедр – основного источника формирования инженерно-технического состава войсковых частей, эксплуатирующих современные РЭС ДО.

Ключевые слова: информационно-образовательная среда; учебно-тренировочные средства; автоматизированная обучающая система; адаптивный контроль знаний; профессионально-должностная подготовка.

ВВЕДЕНИЕ

Использование последних достижений науки и техники при создании РЭС ДО позволило сделать ее адаптивной к неблагоприятным внешним условиям и помеховой обстановке, минимизировать расходы на создание и эксплуатацию, существенно сократить численность обслуживающего персонала по сравнению с предыдущим поколением РЭС ДО [1]. Но усложнение аппаратуры и программного обеспечения неизбежно приводит к возрастанию требований к квалификации инженерно-технического состава, эксплуатирующего современное вооружение.

Основными средствами подготовки военных специалистов и поддержания их навыков и умений на высоком уровне являются учебно-тренировочные средства РЭС ДО. Целью использования УТС является обеспечение возможности обучения и поддержания уровня подготовки личного состава на уровне, необходимом для грамотной эксплуатации изделия. Под грамотной эксплуатацией понимаются знания технических характеристик и возможностей изделия, а также уверенное владение средствами изделия и способность поддерживать его в готовности в соответствии с требованиями, изложенными в его эксплуатационной документации.

С учетом высокого уровня автоматизации РЭС ДО и необходимости обеспечения постоянной готовности УТС должны соответствовать самым высоким требованиям и представлять собой автоматизированную информационно-образовательную среду.

ОБЗОР И СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К ПОДГОТОВКЕ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ОБЪЕКТАХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СТАНЦИЙ ДАЛЬНЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ РЭС ДО

При рассмотрении подходов к подготовке военных специалистов на объектах РЭС ДО следует учесть ряд особенностей:

- размещение объектов в местах, территориально удаленных от крупных населенных пунктов;
- отсутствие квалифицированного профильного штатного педагогического состава.

Принимая во внимание показатель степени автоматизации процесса обучения, можно выделить три основных подхода при подготовке военных специалистов, применяемых на объектах РЭС ДО:

- «традиционный» подход к обучению;
- «автоматизированный» подход с применением автоматизированных средств обучения;
- адаптивный «кибернетический» подход с применением автоматизированной информационно-образовательной среды.

Прежде чем рассмотреть перечисленные подходы, определим основной критерий эффективности их применения.

Основными показателями качества подготовки целесообразно выбрать степень освоения компетенций, которыми должен овладеть обучающийся. Наборы компетенций выбираются исходя из квалификационных требований по специальности, определяемых ФГОС МО, и должностных обязанностей будущих специалистов.

Профессиональные компетенции можно декомпозировать на три группы [2]:

1. Общепрофессиональные – $K_{Поп}$.
2. Профессионально-деятельностные – $K_{Ппд}$.
3. Специализированные (служебные) – $K_{Пс}$.

Каждая группа включает наборы компетенций по требованиям, предъявляемым к специалистам в соответствии с содержанием и спецификой их профессиональной деятельности.

Оценка уровня профессиональной подготовки каждого обучающегося $Z_{кп}$ может быть определена как интегральная оценка профессиональных компетенций с учетом весовых ко-

эффициентов K_i при $\sum_{i=1}^n K_i = 1$:

$$Z_{кп} = Z_{кп_{оп}} \cdot K_{кп_{оп}} + Z_{кп_{пд}} \cdot K_{кп_{пд}} + Z_{кп_{с}} \cdot K_{кп_{с}}. \quad (1)$$

При рассмотрении каждой из перечисленных концепций обучения произведем моделирование процесса обучения одного обучающегося исходя из следующих предположений [3]:

- обучающийся характеризуется коэффициентами обучения и забывания (α и γ);
- к обучающемуся предъявляются требования $U = U(t)$;
- текущий уровень знаний в области профессиональных компетенций $Z_{кп}$ может быть рассчитан по формуле (1) на основе эмпирических данных, полученных в результате автоматизированного контроля;
- скорость увеличения знаний пропорциональна произведению знаний обучающегося Z в степени b ($0 \leq b \leq 1$), где b зависит от степени влияния имеющихся знаний на усвоение новой информации:

$$dZ / dt = \alpha M Z^b; \quad (2)$$

– мотивация учащегося M прямо пропорциональна разности между уровнем предъявляемых требований U и уровнем знаний Z :

$$M = k(U - Z); \tag{3}$$

– скорость забывания пропорциональна количеству имеющихся у обучающегося знаний:

$$dZ / dt = -\gamma Z; \tag{4}$$

– скорость изменения уровня знаний (рис. 1) с учетом выражений (2) и (4)

$$dZ / dt = \alpha M Z^b - \gamma Z. \tag{5}$$

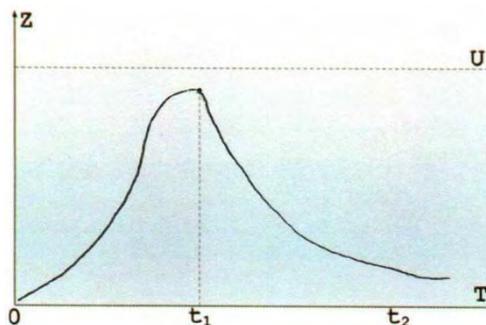


Рис. 1. График изменения уровня знаний при обучении и забывании

В процессе моделирования учтем следующие стадии жизнедеятельности обучающегося:

- обучение;
- несение дежурства;
- отпуск/выходные.

«Традиционный» подход к обучению. Особенностью применения такого подхода является ведение тетради личной подготовки, самостоятельное изучение технической и эксплуатационной документации из архива в/ч, выполнение приказов командира, отданных в целях овладения знаниями и навыками эксплуатации аппаратно-программных средств различного уровня детализации (рис. 2).



Рис. 2. Методы и средства, используемые в рамках «традиционного» подхода к обучению

Результаты моделирования представлены на рис. 3.

«Автоматизированный» подход к обучению. Особенностью применения «автоматизированного» подхода к обучению является активное использование учебно-тренировочных средств (рис. 4). Ими являются:

- автоматизированное обучение по утвержденным электронным курсам технической и специальной подготовки с применением современной теории тестового контроля;
- оперативный доступ к электронной технической и эксплуатационной документации;
- электронный контекстный глоссарий;
- ведение электронного журнала и построение рейтинга успеваемости.

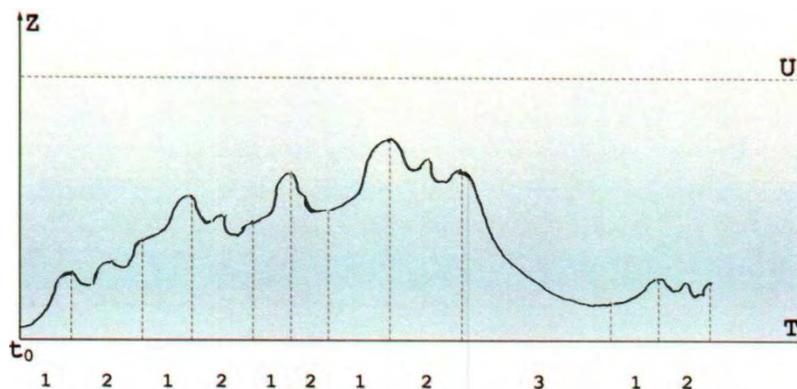


Рис. 3. График изменения уровня знаний, характерный для «традиционного» подхода к обучению:

1 – изучение технической документации (ТД) и эксплуатационной документации (ЭД), самоподготовка; 2 – несение дежурства; 3 – отпуск

Применение средств автоматизации не исключает применения методов выработанного годами «традиционного» подхода к обучению военных специалистов, а расширяет возможности и повышает качество процесса обучения.

Результаты моделирования представлены на рис. 5.



Рис. 4. Методы и средства, используемые в рамках «автоматизированного» подхода к обучению

«Кибернетический» подход к обучению. Этот подход включает в себя все достоинства «автоматизированного» подхода к обучению, а также предусматривает использование до-

полнительного функционала по проведению адаптивного контроля и построению индивидуальных траекторий обучения, направленных на укрепление знаний и умений, необходимых при выполнении непосредственных должностных обязанностей в рамках индивидуальной подготовки (рис. 6).

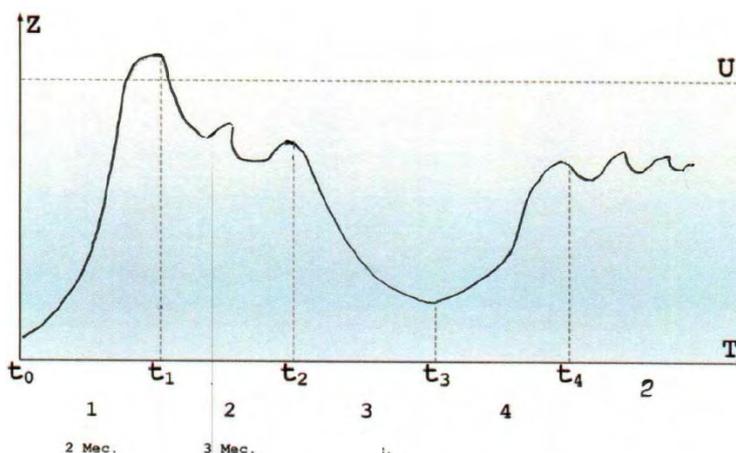


Рис. 5. График изменения уровня знаний, характерный для «традиционного» подхода к обучению:

1 – базовая подготовка (ввод специалиста в строй); 2 – несение дежурства; 3 – отпуск; 4 – сокращенный курс подготовки к несению дежурства

Результаты моделирования представлены на рис. 7.



Рис. 6. Пути достижения постоянной готовности с применением адаптивной АИОС методами и средствами «кибернетического» подхода к обучению

Вывод по результатам сравнения подходов подготовки военных специалистов на объектах РЭС ДО. С учетом специфики размещения объектов и отсутствия штатного педагогического состава очевидны преимущества подходов, основанных на применении автоматизированных средств обучения.

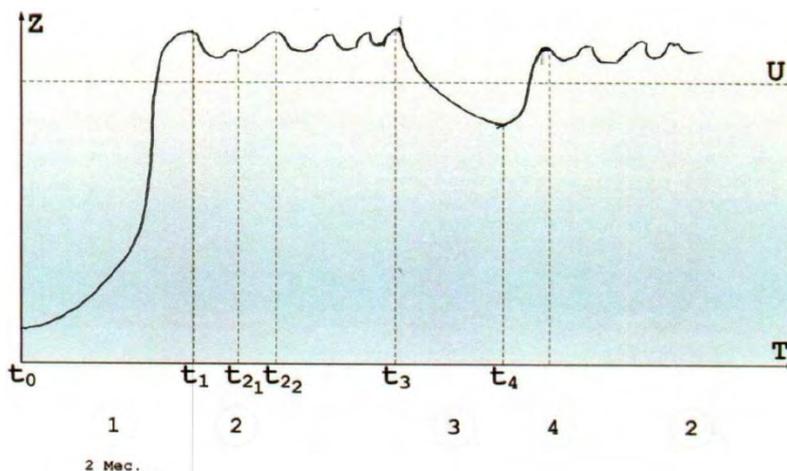


Рис. 7. График изменения уровня знаний, характерный для «кибернетического» подхода к обучению:

1 – базовая подготовка (ввод специалиста в строй); 2 – несение дежурства и промежуточный адаптивный контроль уровня подготовки; 2₁ – в результате контроля не подтвержден уровень подготовки; 2₂ – прохождение индивидуального курса восстановления уровня подготовки; 3 – отпуск; 4 – сокращенный курс подготовки к несению дежурства

При сравнении результатов применения «автоматизированного» и адаптивного «кибернетического» подходов можно сделать вывод о корреляции эффективности на первых этапах проведения базовой подготовки. Далее графики показателя эффективности расходятся. Несомненно, что только нацеленность адаптивного «кибернетического» подхода на поддержание постоянного уровня готовности способна обеспечить достижение цели, а именно – поддержание постоянной готовности военного специалиста к выполнению поставленных задач.

ПОСТРОЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ РЭС ДО

Подготовка специалистов на объекте (РЭС ДО) должна проводиться с применением УТС, поставляемых в составе изделия. Основными средствами, входящими в состав УТС, являются (рис. 8):

1. Учебно-методическое обеспечение (УМО).
2. Аппаратно-программные средства (АПС).



Рис. 8. Состав учебно-тренировочных средств РЭС ДО

Кроссплатформенная автоматизированная информационно-образовательная среда (АИОС) подготовки военных специалистов РЭС ДО строится с учетом специфики учебно-

методического обеспечения (УМО) и реализуется на аппаратно-программных средствах (АПС) УТС.

Структурированные электронные учебные материалы из состава УМО размещаются в базе данных ФПО УТС. Методическое обеспечение, модели обучаемого и автоматизированного обучения описываются формализованными алгоритмами, которые реализовываются в ФПО УТС. На основе УМО в ФПО УТС выстраиваются курсы подготовки военных специалистов. Обучение на УТС подразумевает поэтапное овладение и закрепление полученных знаний и навыков.

Дидактический материал из состава УМО УТС – это электронный документ (ЭД) или интерактивный электронный документ (ИЭД) [4]. Содержание ДЭ и ИЭД отображается средствами инструментального ФПО на АПС. Исходя из формата электронного представления дидактических и справочных материалов, а также способов взаимодействия и применения ПЭВМ в качестве базовой, выбрана концепция программированного обучения [5]. Сущность программированного обучения заключается в обучении «думать». Первыми шагами на пути обучения «думать» является изучение алгоритмических предписаний, структурированных в виде курса обучения, состоящего из взаимосвязанного учебного материала, последовательно предъявляемого обучаемым [6]. Применение средств электронно-вычислительной техники в учебном процессе также позволяет использовать дополнительные средства, повышающие эффективность обучения, такие, как справочно-информационное обеспечение учебных занятий, тренировочные средства на основе имитационного обеспечения из состава РЭС ДО и др.

Выбор концепции программированного обучения не исключает возможности применения и других концепций, применение которых в качестве частных дидактик эффективно при решении ряда задач различных видов подготовки. В зависимости от конкретных задач обучения применимы следующие концепции обучения:

- «Ассоциативно-рефлекторная теория обучения» (И.П. Павлов, И.М. Сеченов);
- «Теория поэтапного формирования умственных действий и понятий» (П.Я. Гальперин, Д.В. Эльконин, Н.Ф. Талызина);
- «Теория проблемно-деятельностного обучения»;
- «Контекстное обучение» [7].

Каждый обучающийся, погруженный в автоматизированную информационно-образовательную среду, обладает двумя важными с точки зрения управления процессом обучения особенностями, описываемыми двумя моделями. Ими являются:

1. «Компетентностная» (профессиональная) модель [8, 9].
2. «Психофизическая» (личностная) модель [10, 11].

Интегральный анализ профессиональных и личностных характеристик обучающегося значительно расширяет спектр и точность педагогического воздействия в процессе профессионального обучения и даже развития его личностных качеств.

В задачи автоматизированной информационно-образовательной среды в части работы с обучающимися входит обеспечение:

- доступа к информационно-справочным материалам (электронной эксплуатационной и прочей документации, глоссарию);
- доступа к базовым курсам подготовки (технической, специальной и пр.) с интегрированными промежуточными и итоговыми тестами, тренировками и практическим контролем навыков, выработанных в результате упорных тренировок;
- возможности проведения комплексных групповых тренировок по слаживанию действий расчета в полном и сокращенном составе (с подыгрывшем АИОС) за счет наличия компонента взаимодействия с имитационным и штатным ФПО РЭС ДО;
- доступа к индивидуальным курсам обучения, сформированным на основании результатов адаптивного тестирования с учетом личностных психофизических особенностей обучающегося;

- роста мотивационной составляющей за счет непрерывного контроля интегральной оценки успеваемости, активности и скорости освоения новых знаний и навыков;
- возможности коллективного решения вопросов, связанных с эксплуатацией объектов РЭС ДО за счет использования средств межпользовательского взаимодействия;
- личного вклада в процесс формирования учебно-методического обеспечения и определения его качественных характеристик.

Образовательная среда в рамках гибридной, групповой и ролевой моделей доступа также оснащается обширным функционалом для работы пользователей с ролями «педагог-инструктор», «редактор», «руководитель», «администратор». Для каждой роли определен набор доступного функционала, позволяющий сделать АИОС мощным инструментом, применимым и в учебном процессе военного вуза для подготовки как специалистов эксплуатации РЭС ДО, так и специалистов других специальностей.

Основными тенденциями дальнейшего развития современных автоматизированных систем обучения являются [12]:

1. Развитие аудиовизуальных средств. Применение таких средств позволяет за несколько минут показать течение процессов, длящихся годами, или исследовать процессы, доступ к которым в реальной обстановке обходится слишком дорого. Включение в состав автоматизированных синтезаторов звука позволит акустически воздействовать на обучающегося. Могут быть воспроизведены авторские лекции, корректирующие команды, звуковые сигналы оповещений и т. п. Для регистрации действий и речи обучаемых могут быть использованы средства видео/аудиозаписи и соответствующие анализаторы. Особую нишу занимают 3D-технологии [13], с помощью которых могут быть реалистично воссозданы необходимая окружающая обстановка, действия реальных или мнимых персонажей, необходимых при определенных видах тренировок, и др.

2. Интеграция с другими системами. Наличие обучающих курсов и информационно-поисковых систем, с помощью которых любой инженер может самостоятельно овладеть навыками работы с автоматизированной системой. При этом экономится время на обучение и отпадает необходимость в многократном тиражировании документации. Интеграция со штатным ФПО РЭС ДО дает возможность проведения интерактивных тренировок с использованием аттестованных, а значит, максимально приближенных к реальности имитационных средств. Такие тренировки являются особенно эффективными при отработке индивидуальных действий и слаженности расчетов в целом в различных условиях имитируемой обстановки.

3. Внедрение в автоматизированные системы обучения функционала экспертных систем. В основе экспертной системы лежит не база данных, а база знаний, которая формализует знания и опыт в определенной предметной области. Экспертные системы можно с успехом применить при решении различных слабоформализуемых задач, например задачи «расстановки» кадров [14, 15], т. е. задачи определения максимальной предрасположенности и профессиональной готовности к выполнению конкретных видов деятельности: инженерной, командно-штабной и др. В том же направлении интенсивно развиваются перспективные системы искусственного интеллекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированная информационно-образовательная среда подготовки военных специалистов может быть успешно построена на базе учебно-тренировочных средств РЭС ДО.

Основными тенденциями развития автоматизированных информационно-обучающих систем являются следующие:

- применение различных концепций обучения в целях достижения максимальной эффективности обучения при опоре на базовые концепции программированного и компетентностно-ориентированного обучения;
- создание индивидуального портрета обучающегося на основе анализа компетентностной и психофизической составляющих;
- построение индивидуальной траектории обучения с применением адаптивных технологий;
- разработка гибкого информативного многофункционального пользовательского интерфейса;
- развитие аудиовизуальных средств представления информации;
- тесная интеграция со штатными системами обработки и отображения информации, а также имитационными средствами изучаемых образцов ВВТ;
- внедрение функционала экспертных систем.

Применение АИОС в составе УТС способно обеспечить значительное повышение качества эксплуатации РЭС ДО за счет следующих мероприятий:

- повышения уровня подготовки;
- снижения процента отказов аппаратно-программных средств по вине «человеческого фактора»;
- сокращения временных интервалов восстановления работоспособности неисправных аппаратно-программных средств.

Автоматизированная информационно-образовательная среда – опора подготовки военных специалистов объектов РЭС ДО в решении задач обеспечения и поддержания постоянной готовности к выполнению поставленной задачи. Симбиоз АИОС и традиционных методов и средств подготовки может дать еще больший эффект в части углубленного изучения технической, специальной и прочих видов подготовки.

Кроссплатформенная АИОС также может быть рекомендована для внедрения в процесс подготовки военных специалистов в высших военных учебных заведениях. Внедрение АИОС позволит существенно повысить качественные показатели профессионального обучения: расширить возможности применения учебно-методических средств в рамках традиционных форм высшего образования, сформировать систему общей образовательной среды для реализации концепции непрерывной подготовки военных специалистов, развивать вариативность образовательных программ, реализовать прозрачную и объективную систему оценки индивидуальных образовательных достижений.

Список используемых источников

1. *Сухарев В.Н.* РЛС нового поколения // Официальный сайт ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца». – URL: <http://www.rti-mints.ru/rls-novogo-pokoleniya> (дата обращения: 10.09.2017).
2. *Евтихов О.В.* Формирование профессиональной компетенции курсантов в образовательной среде вуза правоохранительных органов: дис. ... д-ра пед. наук. – Красноярск, 2015. – 424 с.
3. *Майер Р.В.* Кибернетическая педагогика: имитационное моделирование процесса обучения. – Глазов: ГГПИ, 2014. – 141 с.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ 2.051–2006. – ЕСКД, 2006. – 12 с.
5. *Ланда Л.Н.* Алгоритмизация в обучении. – М.: Просвещение, 1966. – 523 с.
6. *Рапацевич Е.С.* Золотая книга педагога. – Минск: Современная шк., 2010. – 720 с.
7. *Лепешкин С.А., Харебин Д.А.* Применение современных информационных технологий в процессе подготовки кадров высокотехнологичных радиоэлектронных средств дальнего обнаружения // Материалы Всероссийской научно-практ. конф. «Проблемы и основные

направления развития радиоэлектроники и образовательного процесса подготовки специалистов радиотехнических систем специального назначения». – Череповец, 2017. – Ч. 2, т. 2. – С. 31–35.

8. *Троянская С.Л.* Основы компетентного подхода в высшем образовании. – Ижевск, 2016. – 176 с.

9. Information technologies in engineering education project activity and competence assessment / О.М. Zamyatina, P.I. Mozgaleva, K.V. Gulyaeva, E.T. Sakharova // International Multidisciplinary Scientific Conferences on Social Sciences and Arts (SGEM 2014): Psychology and psychiatry, sociology and healthcare, education. – 2014. – Vol. 3. – P. 411–418.

10. Психофизика сегодня / В.Н. Носуленко, И.Г. Скотникова, Е.Н. Соколов и др. – М.: ИП РАН, 2006. – 339 с.

11. *Бонч-Бруевич В.В., Кремез А.С., Чирков Б.П.* Развитие профессиональных навыков с помощью психофизического тренажера // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 7. – С. 49–51. – URL: http://avtprom.ru/system/files/49-51_2.pdf (дата обращения: 18.09.2017).

12. *Румянцев П.А., Чакрян В.Р.* Использование автоматизированных обучающих систем для повышения эффективности обучения // Теория и практика общественного развития. – 2014. – № 19. – URL: http://teoria-practica.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/2014/19/pedagogics/rumyantsev-chakryan.pdf (дата обращения: 19.09.2017).

13. *Scagnetti L.* Automated Culture Training System. School of Computer Science Reykjavik University Menntavegi. – Reykjavik, 2012. – 37 p.

14. *Копытенкова О.И., Алиев О.Т.* Психофизические методы для определения профессиональной пригодности машинистов железнодорожного транспорта // Интернет-журн. «Наукоедение». – 2014. – Вып. 5 (24). – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/90TVN514.pdf> (дата обращения: 19.09.2017).

15. *Patil P., Gatarane P., Dakhare II.* Automated Training and Placement System (TPS) // IJSRD – International Journal for Scientific Research & Development. – Mumbai, 2017. – Vol. 5, issue 02. – P. 842–844.

Aleynik V.V., Goncharevsky V.S. The History of the Faculty of Automated Control Systems // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 5–9.

The article deals with the causes and origins of the establishment of the Faculty of Automated Control Systems in the Mozhaisky Military Aerospace Academy. The main stages of its emergence, formation and development in various historical periods of its activity are analyzed. Characteristics of the training at the faculty of specialists in automation management. The basic directions of research of the cathedral scientific schools are outlined. Examples are given of their participation in the development of specific automated control systems that have stood and are now in the arsenal of the Air and Space Forces.

Key words: faculty; department; automated control system; scientific school; Scientific research.

Bakhmut A.D., Krylov A.V., Okhtilev P.A. Approach to the synthesis of polymodel complex of monitoring the technical state and reliability of the space vehicle “Soyuz-2” at all stages of its life cycle // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 10–19.

The article considers the approach to assessing the technical state (TS) and reliability of the launch vehicle (LV) “Soyuz-2” with the decision-making support (DMS) for managing its life cycle (LC). The modern problems and the requirements for the efficiency, quality and reliability for assessment the TS of space vehicles are considered. The analysis of subject area has shown the need of the presented in the article new intelligent information technology (IIT) application in the development of the TS monitoring systems and DMS for managing the LV “Soyuz-2”. As a theoretical basis of such technology the modification of the generalized computational model (GCM) as a knowledge representation model, allowing to build simulation-analytical model-based complexes for monitoring states and managing complex organizational and technical objects (COTO), is considered. In the article it is shown that the considered approach allows to assess complexly the TS and reliability of the LV “Soyuz-2” at all stages of its LC.

Key words: state monitoring; complex organizational and technical object; artificial intelligence system; theory of structural dynamics control.

Danilov A.I., Zubachev A.M., Bugaichenko P.Y. Dynamic model for accessing the quality of a spacecraft control session // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 20–26.

It proposes a dynamic model for quality assessment of spacecraft control session preparation and execution. The control session modeling uses an improved marked graph and is considered in the framework of random Markov processes with discrete set of states and continuous time. Improved labeled graphs and differential equations system are provided. It numerical solution allows to calculate probabilistic indicators of control session quality. Results of computational experiment are analyzed.

Key words: model, control session, fault, probability, intensity, graph.

Goncharevsky V.S. Features and control methods of mutual maneuver spacecraft in the implementation of docking with orbital stations // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 27–33.

The report analyzes the characteristics and control methods of mutual manoeuvre of the spacecraft when performing docking with space stations with multiple docking ports for two practically important cases. In the first case it is assumed that the OS may execute a counter-orientation (orientation of the axis of the specified docking port in the direction of the TC, i.e. in the direction of the line of sight OS-TK). The second practically important case corresponds to the situation where an inverted orientation on the OS is missing. The features of the use of methods of convergence rela-

tive to the line of sight and methods of available trajectories to perform the mutual maneuver in these two cases.

Key words: space station; mutual maneuvering; line of sight; the docking station; the relative movement.

Legkov K.E., Orkin V.V. To the question of modeling of the functioning of the information subsystem of the automated control system // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 34–42.

The work is devoted to research in the area of information systems efficiency and to development of a functioning model of the information subsystem of the automated control system. Information flows distribution problems in the automated control system for special purpose and the questions of the possibility of its effective functioning under the influence of computer attacks on the information subsystem are considered.

Key words: information system model; stochastic matrix; probability of timely delivery; information provision; automated control system.

Mosin D.A., Sadykov D.V., Skripnikov A.N. Methods of ballistic substantiation of the structure of the orbital grouping of spacecraft of continuous service in the Arctic region // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 43–50.

In the article was told about the methods of ballistic grounding of the determined orbital group of small spacecrafts of continuous service of Earth's polar regions, built on the principle of «system-network» on the parapolar nearsphere orbits, that permits to calculate the ballistic structure of the orbital groups of continuous service of Arctic zone for the solution of different goals.

Key words: small spacecraft, system-network, ballistic structure, continuous service, arctic region.

Principles and examples of the remote sensing technology use for information support of spatial data infrastructures / A.N. Grigoriev, G.G. Dmitrikov, T.V. Popovich, A.A. Pyatitskiy, O.V. Smirnova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 51–59.

The general classification of remote sensing objects is proposed. Remote sensing is realized by using air carriers of optoelectronic onboard special complexes. The basic principles of using aerial survey systems are considered. Systems are based on matrix digital optoelectronic cameras. The dependences of performance indicators on the typical values of the functioning parameters of the air carrier and of the onboard special complex are displayed. The results of aerial survey planning taking into account the flight conditions of the air carrier and of the parameters of the onboard special complex are presented. The results of applied experiment on the basic spatial data formation on the basis of the results of aerial photographs photogrammetric processing are presented.

Key words: remote sensing, optoelectronic survey, information support, spatial data, object and mode of survey.

Antoshina V.M., Kazantsev A.M., Linkevichius A.P. The aggregation of static and dynamic models for estimation of reliability of large-structure early warning radar // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 60–68.

The article presents the features of the new generation early warning radar as a multi-level system of a functional-block structure.

It is shown that the decomposition of early warning radar into large functional systems makes it possible to determine the list of constructive elements that ensure the solution of problems of functional systems, thus ensuring not constructive but functional-constructive division of the radar.

Dynamic and static methods and models are considered, which can be used to calculate the reliability of such complex technical systems as early warning radar. The factors causing the inadequacy

of the use of only statistical models for calculating the reliability parameters of the radar station are given. It is shown that for the most accurate estimation of reliability indicators of early warning radar it is necessary to use aggregation of statistical and dynamic calculation models.

Key words: early warning radar; functional-constructive matrix; reliability index; dynamic and static model; maintenance.

Method of troops supply system organization by complete sets of military-technical communication and automated control systems property / A.A. Burlakov, G.P. Doroshenko, I.V. Levko, K.E. Legkov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 69–76.

In modern combat conditions, the main source of replenishment of the combat losses of weapons, military and special equipment is the system of reconstruction. The effectiveness of the recovery system is directly dependent on the availability of spare parts, units, units used in the repair. In the course of military operations, the repair of military communications equipment and automated control systems is carried out using sets of military-technical communications assets. The results of the analysis of the existing system for supplying troops with military-technical communications equipment and automated control systems (ACS) testify to its incomplete compliance with the requirements. The stocks of military-technical communications equipment, currently created, partially provide for the repair of communications equipment of the old park, no modern reserves of communication are being created. In many respects existing problems are caused by imperfection of existing methods of creation of stocks.

Key words: communication technique and automated control systems; military technical equipment of communication, technical provision of communications equipment and automated control systems; spare parts, tools and accessories; maintenance; average repair.

Gorbulin V.I., Khodor M.A. Mathematical basis for the automatic distribution of areas of responsibility of the elements of opto-electronic systems segment monitoring // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 77–85.

Considered monitoring system of air space, which are based on radiolocation stations. The identified problem of a lack of alternative sources of information for monitoring airspace.

Considered electronic interference as the main negative factor affecting the process of formation of the field of observation. The analysis of the effects of various types of electronic jamming on radar. Described criterial norm of jamming, radiolocation stations intentional jamming signal. Given the equation of jamming, giving the possibility to analytically determine the shape and size of a zone of suppression. Estimates and presents a graphical explanation of the impact on the implementation of the conditions of suppression of the yaw rate and covering up required objects relatively suppressed radar station at fixed coordinates post-NOVICA interference. Estimates and presents a graphical explanation of dependence of the suppression factor from the distance to cover objects at fixed coordinates of the source of the interference.

Key words: field radar; electronic countermeasures; electro-optical means; description of area; R-function; the Dirichlet region.

Coordination planning of cluster of small spacecrafts in problems of monitoring the earth's surface / K.G. Kolesnikov, A.A. Masalkin, B.V. Moskvina, A.E. Shulgin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 86–94.

The problem of planning the target application of the cluster of small spacecrafts for remote sensing of the Earth based on the use of coordination methods is considered. The criterion for evaluating the effectiveness of the plan is the completeness of the information provided to consumers. The admissibility of the received plan is determined based on the limitations imposed on the process of the target application of the cluster of small spacecrafts for remote sensing of the Earth. To solve the problem of planning the application of the Earth remote sensing cluster of

small spacecrafts, the Danzig-Wulf algorithm is used, in which the resulting plan for cluster application is built by coordinating the individual plans for the application of individual MCA monitoring of the earth's surface. The planning takes into account the main resource, time, technical and technological constraints imposed on the process of the ICA's functioning.

Key words: coordination planning, cluster of small spacecrafts, Earth remote sensing.

The promising model of the computing system that implements multiple ability to organize data exchange between its components / N.V. Kochenov, I.A. Ledyankin, D.V. Negodin, O.E. Nesterenko, // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 95–101.

It is shown that in conditions of a snowballing increase in the flow of the incoming radar information on the means of monitoring ballistic and space objects, there is an objective need to improve the efficiency and effectiveness of computational tools and systems.

It is shown that one of the ways of increasing the performance of computer systems performing information processing on automated systems for the monitoring of ballistic and space objects, is to optimize the structures of parallel programs that implement algorithms for data processing, for execution on specific computing systems.

Objective identified the need to exchange information between the components of the promising computing system having multiple possibilities for organization of data exchange between computing nodes, the development of complex software, to improve performance, through the rational distribution of operations of a parallel program between computing nodes.

Proposed a conceptual model of the promising computing system that implements multiple ability to organize data exchange between its components. The developed model takes into account the topology of networks of computational modules, structure and characteristics of a program implementing the algorithm of information processing; an execution plan operations and plan of operations of programme for components of the computing complex.

Key words: computer system, computing system, optimization, parallel computing, scheduling, information processing, parallel programs.

Kravtsov A.N., Novikov A.N., Shiryamov O.A. Mathematical model of forecasting of change of the critical component of the error of the working standard of measure unit taking into account priori information // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 102–109.

The article proposes a mathematical model of forecasting of change of the critical component of the error of the working standard of measure unit, which is a part of jobs on checking of the measuring instruments, located on the basis of mobile multifunctional metrological complexes, taking into account priori information. Owing to objective difficulties when finding direct dependence of change of an error of a working standard on influence of factors of the environment it is offered to investigate process of change of an error of a working standard as function of time, and to consider impact of factors on an error indirectly, when modeling change of an error in time. The offered mathematical model, unlike existing, allows to consider, on the one hand, the individual nature of change of the critical making error of a concrete working standard in specific conditions of operation, with another – existence of aprioristic information on measurement of similar parameters at the same working standards. In article is provided the description of process of finding of the most plausible estimates of mathematical expectation of parameters of the predicting function. The received dependence allows to estimate value of a critical component of an error of a working standard for any interval of forecasting, but with various accuracy.

Key words: a critical component of an error, priori information, estimates of parameters of the predicting function, a method of maximum likelihood, density of distribution of probabilities of errors of results of measurement of an error.

Samoylov E.B., Shmelev V.V. Method of synthesis of functional and logical programs of stream calculations when monitoring the condition of technical systems // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 110–120.

The description of a method of the description or programming of operations of monitoring of a condition of technical system in the conditions of influence of the perturbing factors is provided. As initial information ways of representation of technologies of functioning of technical systems are considered: tables of timing, Gantt's chart. Distinctive feature of a method of synthesis of programs is adaptation adjustment of the synthesized program for the purpose of accounting of the factors perturbing process of future monitoring.

Key words: theory of calculations, functional and logical programming, stream calculations, processing of measuring information.

Deev V.V., Kopkin E.V., Tkachenko V.V. Analysis of the opportunities of LTE technology in the systems of transmission and processing of telemetrical information // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 121–130.

The article discusses the operations of LTE technology, which allow to increase the data transfer rate while reducing the hardware and operating costs. The principle of forming a signal with multifrequency modulation is described, as well as the use of multi-position modulation and noise-immune codes to increase the frequency and energy efficiency of data transmission. A block diagram of the transmission of telemetric information is presented, in which it was noted the expediency of using LTE technology for efficient, efficient and flexible information transfer.

Key words: data transmission; standard; data stream; data transfer; processing of measurement information; Information Technology.

Lepeshkin S.A., Mishukov O.A. Peculiarities of joint processing of the different pictures in automated systems remote sampling of distributed objects // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 131–140.

In the article the peculiarities of joint processing of different-spectral images in automated remote sensing systems of distributed objects. The work is conditioned by the need to improve the quality of functioning of automated remote systems probing distributed objects using sensors of different physical nature.

Each the sensor makes it possible to obtain images of distributed objects in different spectral ranges, has both advantages and limitations in the application. Limitations on the application of individual sensors lead to a decrease in the information content of the images.

A method joint processing of optical and radar images in automated systems remote sensing of distributed objects, the basis of which is the procedure for integrating images.

Key words: remote sensing; automated remote sensing system; image fusion; sensors of various physical nature; image informativeness.

Goncharov A.M., Shulgin A.A. Student model in adaptive system of education of specialists in military and dual automated control systems // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 141–150.

Justified building a model of the student as a discrete stochastic system. It is shown that the application of statistical methods of theory of optimal filtering of random processes allows to build adaptive learning system, and the application of methods of theory of systems with random hopping structure to combine automatic control of the learning process with expert adjustments of the process by the teacher.

Key words: level of formation of professional competence, adaptive training system, model student.

Construction of the automated information and educational environment for the preparation of military specialists on the basic training facilities of long-range detection radar / S.A. Lepeshkin, A.S. Logovsky, V.Y. Prorok, D.A. Harebin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 664. – P. 151–160.

The article deals with the issues of constructing an automated information and educational environment (AIOS) for improving the quality of training of military specialists of long-range detection radar (LR DRS).

The analysis and comparison of efficiency of application of the basic approaches on a level of automation of process of preparation of military experts of LR DRS is carried out. It is concluded that it is necessary to build and apply AIOS to improve the quality of training of military specialists of LR DRS. The relationship between raising the level of training and lowering the percentage of failures due to the fault of the human factor, reducing the time to restore the working capacity of hardware and software.

Key words: information and educational environment; training facilities; computer-aided learning system; adaptive knowledge control; professional preparation.

Алейник Виталий Валерьевич, начальник 9-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-00.

Антошина Виктория Михайловна, инженер-программист АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1); e-mail: vantoshina@rti-mints.ru

Бахмут Алексей Дмитриевич, инженер-программист АО «НИО ЦИТ “Петрокомета”» (190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. лит. А); тел.: 8 (911) 753-51-79, e-mail: adbakhmut@gmail.com

Бугайченко Павел Юрьевич, преподаватель 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-58.

Бурлаков Андрей Анатольевич, доцент кафедры Военной академии связи имени С.М. Будённого, г. Санкт-Петербург (194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3); тел.: 8 (921) 756-24-75, e-mail: burlakov38@gmail.com

Гончаревский Вилен Степанович, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук; e-mail: vilenstepan@yandex.ru

Гончаров Алексей Михайлович, заместитель начальника факультета – начальник учебной части Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 830-35-77, e-mail: al-gon@go.ru

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

Григорьев Андрей Николаевич, доцент кафедры 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел. 8 (812) 347-95-51.

Данилов Анатолий Исаевич, доцент 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-58.

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.

Дмитриков Георгий Геннадьевич, преподаватель 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51.

Дорошенко Геннадий Петрович, заместитель начальника кафедры Военной академии связи имени С.М. Будённого, (194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3); тел.: 8 (960) 253-51-12, e-mail: genadoroshenko@yandex.com

Зубачёв Алексей Михайлович, заместитель начальника 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-58.

Казанцев Андрей Михайлович, руководитель проектов АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр.1); e-mail: akazantsev@oaorti.ru

Колесников Константин Григорьевич, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 231-54-32, e-mail: kongrikol@rambler.ru

Копкин Евгений Вениаминович, профессор 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Коченов Николай Валерьевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Кравцов Александр Николаевич, начальник 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-61, e-mail: kan1970@bk.ru

Крылов Алексей Валерианович, начальник отдела оборонно-промышленных комплексов АО «НИО ЦИТ “Петрокомета”» (190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. лит. А); тел.: 8 (911) 130-73-03, e-mail: kralex98@yandex.ru

Левко Игорь Владимирович, доцент 92-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); тел.: 8 (911) 712-04-05, e-mail: levko_iv@mail.ru

Легков Константин Евгениевич, начальник 92-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); тел.: 8 (911) 194-12-42, e-mail: konstl@mail.ru

Ледянкин Иван Александрович, старший преподаватель 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Лепешкин Сергей Анатольевич, заместитель начальника 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: lepehkins@mail.ru

Линкевичиус Александр Павиласа, руководитель комплекса АО «РТИ» (127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1); кандидат технических наук; e-mail: ALinkevichius@oaorti.ru

Логовский Алексей Станиславович, главный конструктор АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (127083, г. Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 612-99-99, e-mail: logovsky@rti-mints.ru

Масалкин Александр Алексеевич, научный сотрудник 271-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 740-02-63; e-mail: of.mas632@yandex.ru

Мишуков Олег Александрович, адъюнкт 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: oleg_mish@mail.ru

Мосин Дмитрий Александрович, докторант 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: mosin-da@mail.ru

Москвин Борис Владимирович, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (953) 352-92-63; e-mail: z-moskvin@mail.ru

Негодин Дмитрий Валерьевич, преподаватель 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65.

Нестеренко Олег Евгеньевич, преподаватель 92-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Новиков Александр Николаевич, доцент 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (904) 602-04-83, e-mail: novalloll@mail.ru

Оркин Вадим Витальевич, адъюнкт 92-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 970-69-52, e-mail: orc225@mail.ru

Охтилев Павел Алексеевич, инженер-программист АО «НИО ЦИТ “Петрокомета”» (190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. лит. А); тел.: 8 (951) 674-79-03, e-mail: pavel.oxt@mail.ru

Попович Татьяна Васильевна, функциональный аналитик АО «СПИИРАН – НТБВТ» (199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 328-01-79.

Пророк Валерий Ярославович, профессор 95-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, e-mail: val_prorok@mail.ru

Пятицкий Алексей Александрович, начальник учебной лаборатории 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51.

Садыков Денис Викторович, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: densvppk@gmail.com

Самойлов Евгений Борисович, старший преподаватель 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: sam876@mail.ru

Скрипников Алексей Николаевич, преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, кандидат технических наук (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: salekseyn@mail.ru

Смирнова Оксана Вячеславовна, старший научный сотрудник АО «СПИИРАН – НТБВТ» (199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 328-01-79.

Ткаченко Владимир Викторович, преподаватель 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vik_hohol@mail.ru

Харебин Денис Александрович, начальник тематического отдела разработки учебно-тренировочных комплексов и средств АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (127083, г. Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1); тел.: 8 (495) 612-99-99, e-mail: dharebin@rti-mints.ru

Ходор Михаил Александрович, преподаватель 95-й кафедры, адъюнкт заочной формы обучения Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 971-17-21, e-mail: khodorvvv@mail.ru

Ширямов Олег Анатольевич, адъюнкт 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-61, e-mail: shiryamov_oa@mail.ru

Шмелёв Валентин Валерьевич, заместитель начальника 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, кандидат технических наук (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: valja1978@mail.ru

Шульгин Александр Евгеньевич, преподаватель 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 257-03-25, e-mail: expert_sa@rambler.ru

Шульгин Алексей Алексеевич, доцент 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 004-20-11, e-mail: warlexx@yandex.ru

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-24, e-mail: alexanderbas@mail.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) 347-95-16.

Горбулин Владимир Иванович, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197082, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 299-27-76, e-mail: v_gorbulin@mail.ru

Гранкин Борис Константинович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-14.

Калинин Владимир Николаевич, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Санкт-Петербургской инженерной академии, член-корреспондент Международной инженерной академии, Российской инженерной академии, Международной академии информатизации; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

Калинин Тимур Валерьевич, профессор 81-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Кузнецов Александр Борисович, начальник 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Лоскутов Андрей Иванович, начальник 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (904) 551-24-91, e-mail: rujenx@mail.ru

Мануйлов Юрий Сергеевич, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: kotmanof@rambler.ru

Онуфрей Андрей Юрьевич, ведущий научный сотрудник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Павлов Александр Николаевич, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, 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, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Полетаев Александр Михайлович, профессор 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Харченко Александр Викторович, начальник 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-32.

Цветков Кирилл Юрьевич, начальник 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-97-25, e-mail: wavelet3@mail.ru

Шабakov Евгений Иванович, старший научный сотрудник 31-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Якунин Владимир Иванович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 230-28-15.