

**Труды Военно-космической
академии имени А.Ф. Можайского**

Выпуск 655

2016 г.

Научное рецензируемое издание

Выходит с 1942 года

Издатель:

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

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.*; **И.Ю. Еремеев**, *доктор техн. наук, проф.*;
М.А. 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. Кунгурова**, *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, доц.*; **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, доц.*

Адрес:

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

Издание зарегистрировано

Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором).

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**

Техническая поддержка:

Н.А. Станкевич

Подписано к печ. 26.12.2016. Формат печатного листа 445×300/4. Уч.-печ. л. 53,00. Уч.-изд. л. 26,25

Тираж 50 экз. Заказ 3341. Отпечатано в типографии ВКА имени А.Ф. Можайского

ISSN 2218-5429

© Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ

- Абазина Е.С., Ерунов А.А.* Сравнительный анализ и классификация методов цифровой и компьютерной стеганографии и перспективные направления ее развития..... 5
- Григорьев К.Л., Кулаков А.Ю., Осипенко С.А., Павлов А.Н., Слинко А.А.* Подход к исследованию структурно-функциональной реконфигурации системы управления движением космического аппарата..... 17
- Забузов В.С., Казанцев Д.И.* Методика повышения оперативности мониторинга технического состояния инфотелекоммуникационных сетей..... 24
- Звонарев В.В., Попов А.С., Пряхин В.А., Шаймарданов А.М.* Развитие теории передачи дискретных сообщений в канале с замираниями сигналов на основе многомерной редуцированной вероятностной меры и ее применение..... 34
- Павлов А.Р., Топорков Н.С.* Метод динамического распределения радиоресурса в сети спутниковой связи с учетом неоднородности трафика..... 40

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

- Аверкиев Н.Ф., Власов С.А., Киселев В.В., Салов В.В.* Обоснование параметров орбит космических аппаратов для повышения числа пролетов над районом поверхности Земли..... 48
- Алехин С.Г., Кулешов Ю.В., Туркин А.А., Шемелов В.А.* Статистическое оценивание вероятности возникновения обледенения в атмосфере на основе схемы комбинации условий..... 54
- Беседин С.М., Кукушкин М.А., Пономарев Д.Ю.* Методика определения предпочтительных вариантов орбитального построения перспективных спутниковых систем связи на основе использования локально-стационарных орбит..... 70
- Власов С.А., Жаткин А.Т., Житников Т.А., Кульвиц А.В.* Синтез орбитальной структуры системы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием баллистически связанных групп космических аппаратов..... 76
- Волков В.Ф., Жигулин Ю.А., Толмачев А.А.* Обоснование требований к параметрам информационного контура системы баллистического обеспечения применения космических систем на основе принципа двойной рандомизации..... 82

<i>Волков Р.В., Малышев С.Р., Севидов В.В., Симонов А.Н.</i> Определение канонических параметров спутников-ретрансляторов по радиосигналам опорных реперных станций.....	88
<i>Голованских И.Г., Матвеев С.А., Петухов А.М.</i> Методика обоснования размещения перебазируемых командно-измерительных систем при обеспечении выполнения задач наблюдения динамично развивающихся чрезвычайных ситуаций космическими системами дистанционного зондирования Земли.....	93
<i>Глебов А.В., Горбулин В.И., Михеев О.Ю.</i> Баллистическое обоснование применения мобильных средств выведения для оперативного развертывания орбитальной группировки малых космических аппаратов.....	97
<i>Елисейкин С.А., Подрезов В.А., Полуаршинов А.М., Ширшов Н.В.</i> Проблемные вопросы расчета районов падения отделяющихся частей ракет-носителей.....	107
<i>Зоткин М.Ю., Миронов В.И.</i> Применение метода приближенного корректирующего оператора для расчета программы управления угловым разворотом космического аппарата с конечным вектором управляющих моментов.....	114
<i>Колесников К.Г., Масалкин А.А., Москвин Б.В.</i> Модель планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	122
<i>Поливанов В.А., Тарасевич К.О.</i> Комплексный подход к обеспечению устойчивости баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	128
РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ	
<i>Басотин Е.В., Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Кукушкин И.О.</i> Синтез систем распределения и преобразования потоков с заданным уровнем надежности.....	134
<i>Басотин Е.В., Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Сулаберидзе Д.В.</i> Модели нештатного функционирования пневмогидравлических систем комплексов заправки ракет космического назначения.....	140
<i>Гудаев Р.А., Королев В.О., Рогов Д.А., Шалдаев С.Е.</i> Математическая модель функционирования системы распознавания.....	150
<i>Королев С.Ю., Фоминов И.В.</i> Алгоритм начальной выставки космического аппарата-робота для выполнения облета орбитального объекта.....	157
<i>Шевченко А.В., Юрьев А.С.</i> Взаимодействие струйных органов управления движением летательного аппарата с неравномерным гиперзвуковым потоком.....	162

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

- Быкова А.Н., Яснова Н.С.* Особенности формирования коммуникативных компетенций на старших курсах военного учебного заведения в рамках дисциплины «Иностранный язык»..... 172
- Станкевич Н.А., Шакирова Э.А.* Отражение современных достижений науки при изучении курса физики в академии..... 177
- Фаттахов Р.Ф., Федирко А.А.* Проблемы разработки и применения психодиагностических средств в работе по укреплению воинской дисциплины..... 183

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

- Некрасов И.Н., Ситков Р.А.* Методика оценивания качества экспертов, привлекаемых к работе в составе рекогносцировочных комиссий..... 190
- Рефераты статей..... 198
- Сведения об авторах..... 204
- Сведения о рецензентах..... 211

Е.С. Абазина,
кандидат техн. наук;
А.А. Ерунов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ СТЕГАНОГРАФИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Представлены основные понятия и определения цифровой стеганографии, освещены вопросы неустоявшейся терминологии в этой области. Определены основополагающие публикации в сфере цифровой стеганографии, приведена уточненная классификация ее направлений и методов (с учетом публикаций последних 5 лет). Представлены основные направления перспективных исследований в этой области и работы, выполненные в рамках определенных направлений.

Ключевые слова: стеганография, скрытые каналы, цифровые водяные знаки, фрактальные широкополосные сигналы, псевдослучайные последовательности, генетические алгоритмы, клеточные автоматы, управление скрытой пропускной способностью, многоканальные стегосистемы.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное распространение и постоянное совершенствование вычислительных и телекоммуникационных систем сопровождаются ростом их пропускной способности, интеграцией услуг, применением все более новых технологий обработки и хранения информации, а также возрастающей сложностью обеспечения безопасности информации. Решение задач совместного обеспечения конфиденциальности, доступности и целостности информации достигается применением криптографических и стеганографических методов ее защиты.

При этом криптография имеет своей целью сохранение в тайне семантики передаваемых сообщений, стеганография же направлена на сохранение в тайне самого факта передачи такого сообщения.

В настоящее время в стеганографии условно выделяют несколько направлений:

- классическую стеганографию, которая включает в себя «некомпьютерные методы» сокрытия сообщений неэлектрической природы;
- компьютерную стеганографию, которая предполагает использование свойств форматов данных, обрабатываемых и передаваемых в инфокоммуникационных сетях;
- цифровую стеганографию, которая основана на избыточности пересылаемых мультимедийных данных, представленных в цифровом виде, изначально имеющих аналоговую природу (изображения, видео, звуки) [1–3]. Далее в статье речь идет о компьютерной и цифровой (в основном) стеганографии.

Анализ публикаций, посвященных стеганографии, позволяет выделить работы [1–3], изданные на территории нашей страны, в качестве базовых как по времени их опубликования, количеству цитат в других источниках, объему представленного материала, так и по числу проанализированных и систематизированных источников по выбранной проблематике. В данных работах изложены основные подходы, принципы и задачи стеганографии и стегоанализа.

Однако стеганографическая наука не стоит на месте и продолжает бурно развиваться, что подтверждают многочисленные публикации и защиты диссертаций, конференции, патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о регистрации программ. Число приложений, позволяющих как осуществлять скрытое встраивание информации, так и проводить анализ на предмет обнаружения таковых вложений, находящихся только в открытом доступе в сети Интернет, измеряется десятками.

Таким образом, в данной статье дополнена и структурирована устоявшаяся классификация стеганографических методов, представленная в [1–3], а также освещены направления и тенденции перспективного развития цифровой и компьютерной стеганографии.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕГАНОГРАФИИ

На настоящий период времени, к сожалению, в области стеганографии не существует каких-либо нормативных документов, регламентирующих классификацию методов, принципов и терминологии, в связи с чем в различных источниках встречается различное понимание одного и того же термина, либо же авторы вводят собственный тезаурус. Определим и уточним основные термины, используемые в цифровой стеганографии и применяемые в статье.

Скрытой (стеганографической) *передачей информации* называют процессы, реализующие методы передачи информации, при которых возможна передача дополнительной информации в структуре данных, представленных в цифровом виде и используемых в качестве контейнера, а также за счет их избыточности.

Под *контейнером* (покрывающим объектом) понимают такие цифровые данные, использование избыточности которых позволяет передавать дополнительную информацию, не обнаруживая факта передачи. Контейнер, не содержащий дополнительной информации, является пустым, в противном случае – заполненным (стега).

Совокупность методик и средств встраивания и извлечения дополнительной информации без обнаружения нарушения целостности контейнера потребителем позволяет говорить о формировании скрытого (стеганографического) канала (СК) передачи информации.

Стеганографической системой (стегосистемой) называют совокупность средств и методов передачи и приема пустого контейнера, функционирующих взаимосвязано со средствами и методами, используемыми для создания скрытого канала передачи информации.

Скрытность (стеганографическая стойкость) определяется возможными действиями (атаками) нарушителя в отношении стегосистемы. В зависимости от целей организации стеговложения под скрытностью понимается его устойчивость к факту обнаружения либо устойчивость к попытке удаления или разрушения стеговложения, когда факт его существования не является тайной для нарушителя. При этом в первом случае атаки, предпринимаемые нарушителем, будут иметь пассивный характер и могут выражаться в проведении следующих мероприятий:

- визуального контроля с целью субъективной оценки качества видеоданных;
- объективного контроля видеоданных по одному (или нескольким) выбранному параметру оценки качества изображений;
- гистограммной атаки.

Во втором случае нарушитель будет проводить геометрические атаки над стега: поворот, масштабирование, сжатие и т.д.

КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Методы цифровой и компьютерной стеганографии в общем виде могут быть классифицированы по целям использования, по виду выбранного контейнера для встраивания, по структуре контейнера (рис. 1).

По целям использования методов цифровой и компьютерной стеганографии общепризнанными являются три направления:

- встраивание скрытых каналов передачи информации – целью встраивания является сокрытие факта передачи информации;

– встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ) – цель встраивания состоит в подтверждении подлинности передаваемых данных и в предотвращении несанкционированного доступа к ним;

– встраивание идентификационных номеров (цифровые отпечатки пальцев) – с целью скрытой аннотации и аутентификации передаваемой информации.

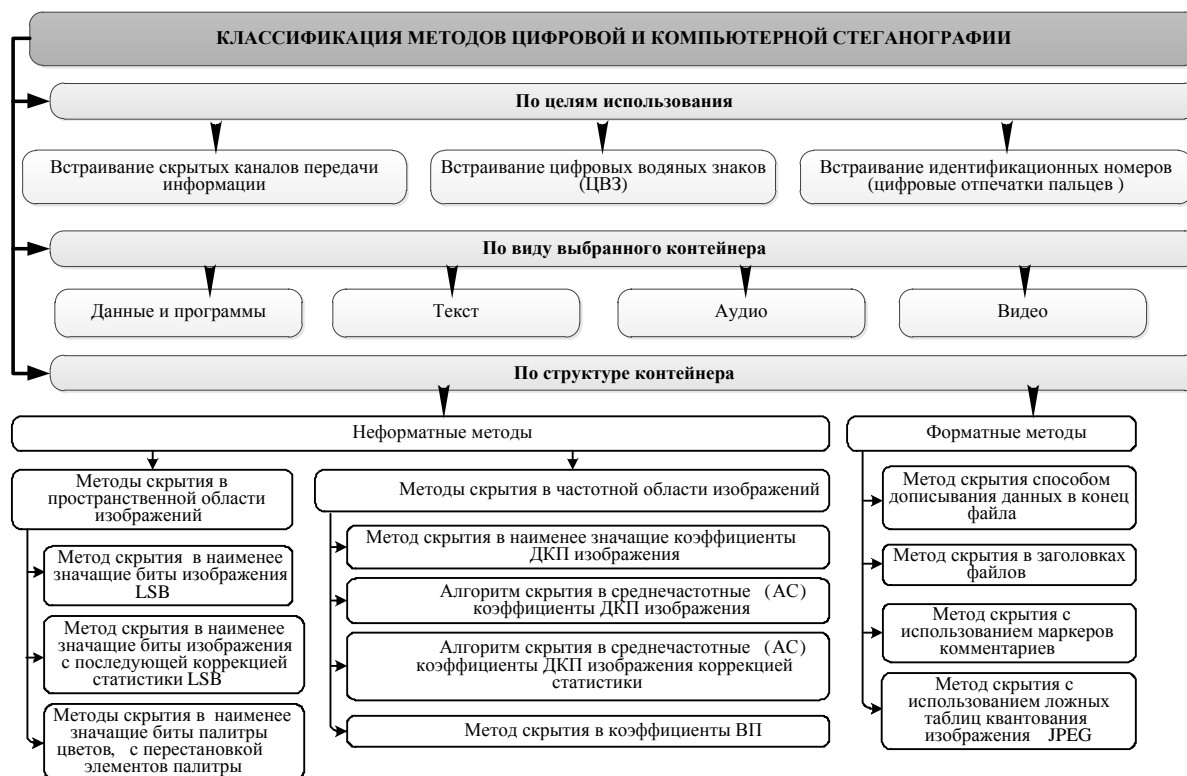


Рис. 1. Классификация методов цифровой и компьютерной стеганографии

Наиболее популярным направлением, получившим развитие в последнее время, является встраивание ЦВЗ. Это во многом определяется необходимостью обеспечения защиты от несанкционированного распространения информации, являющейся интеллектуальной собственностью [4–6]. Организация стеганографических каналов является более актуальным направлением для организаций и ведомств, в которых обеспечение безопасности информации является приоритетным требованием. В связи с тем, что цели, преследуемые при встраивании ЦВЗ и при организации каналов, различны, основные требования, предъявляемые к разрабатываемым стегометодам, имеют ряд отличий. Поскольку ЦВЗ предназначен для защиты от несанкционированного копирования, то знание нарушителем о встраивании ЦВЗ в защищаемый объект не является критичным, в отличие от робастности ЦВЗ, поскольку основной атакой, применяемой в данной ситуации, является геометрическая. При этом задача повышения скрытной пропускной способности не стоит как таковая, в отличие от необходимости обеспечения высокой достоверности приема бит ЦВЗ. При организации скрытого канала же скрытность встраивания является определяющим требованием, и основной атакой является визуальная атака и статистический анализ [7–9]. Кроме того, поскольку при организации стегоканалов речь идет о передаче информации, то следует обеспечить необходимую скрытую пропускную способность и достоверность приема скрываемых данных не хуже минимальной зависимости от вида передаваемых сообщений. В [1–3] представлена более широкая классификация областей применения стеганографии (рис. 2).

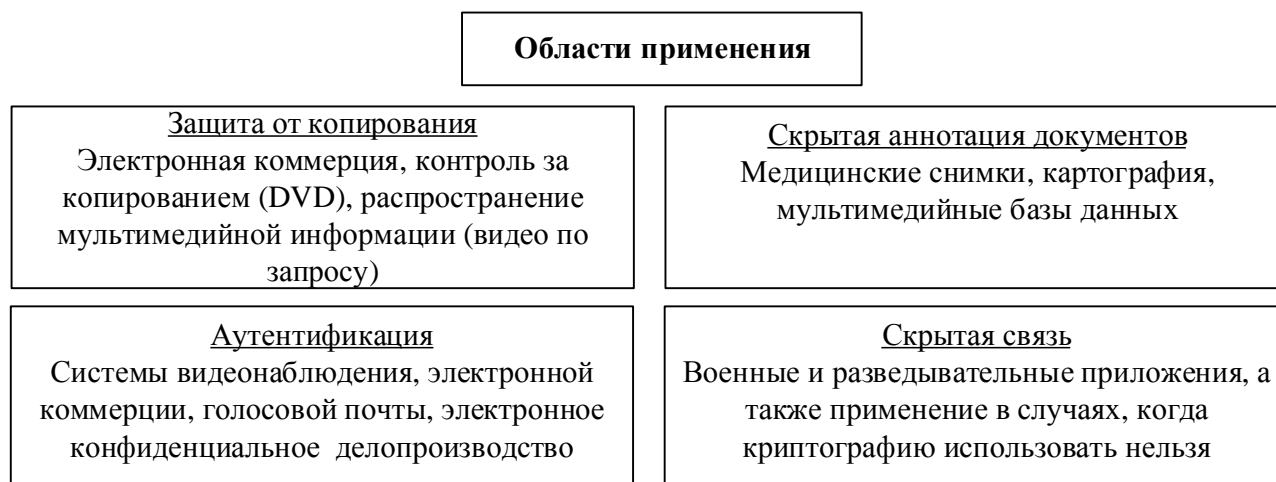


Рис.2. Классификация областей применения стеганографии

По виду контейнера, выбранного для встраивания стеговложений, стеганографические методы разделяют на методы, подвергающие модификации данные и программы, текст, аудио и видео. В связи с тем, что организация скрытых вложений возможна преимущественно благодаря избыточности того вида данных, который выбран носителем, очевидна популярность применения для решения этой задачи аудио- и видеоданных как наиболее избыточных. Стегометоды организации скрытых каналов используют в качестве контейнера в основном аудио- и видеоданные.

В соответствии с тем, какая область в структуре контейнера подлежит модификации, различают *форматные* и *неформатные стегометоды*. Использование первых ограничено невысокой стеганографической стойкостью при довольно низкой пропускной способности и более целесообразно для организации ЦВЗ. Второе направление оказалось более перспективным и базируется на модификации параметров пространства сокрытия файла, характеризующих непосредственно данные самого изображения или звука. В этой области разработаны и хорошо апробированы стойкие к обнаружению стеганографические алгоритмы, обеспечивающие достаточную вместимость контейнеров для вложения скрываемых сообщений или программ. В частности, это и официально признанные алгоритмы стеганографии F5 и outQwest. Поскольку скрытая пропускная способность напрямую зависит от избыточности контейнера, то наиболее применимыми с точки зрения интересов организации скрытой передачи информации являются подвижные и неподвижные изображения.

Процесс выбора контейнера, встраивание скрываемой информации, представление этих процессов в виде моделей в общем виде описаны в учебнике по стеганографии [1–3]. Так, часто используют следующий принцип встраивания данных. Практически любой контейнер в результате обработки может быть представлен последовательностью из N бит. Процесс сокрытия информации начинается с определения бит контейнера, которые можно изменять битами встраиваемой последовательности без внесения заметных искажений. Один из первых методов встраивания стеговложения основан на замене наименее значащего бита контейнера (НЗБ). Такой метод прост в реализации и позволяет достичь максимума скрытой пропускной способности, однако обладает наименьшей скрытностью и робастностью. Это способствовало дальнейшему совершенствованию метода НЗБ, а также поиску новых методов, которые сопровождалось усложнением алгоритмов встраивания и извлечения, а также снижением скрытой пропускной способности. В работах [10–12] отмечено, что встраивание в пространственную область изображений характеризуется раздвоением пика гистограммы, который является демаскирующим признаком, что определяет целесообразность проведения модификации оцифрованных спектральных составляющих контейнера.

Формализация некоторых известных методов, являющихся основой для разработки новых подходов к организации стеговложений, представлена в [12, 13] и приводится в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1

Наиболее известные подходы к организации скрытых каналов и ЦВЗ видеоданных

Классификация методов организации скрытых каналов в видеоданных	Правило встраивания ρ	Пропускная способность скрытого канала $C_{стег}$	Скрытность U	Достоверность скрываемых данных $P_{ош}$	Число скрытых каналов	
1. Направление цифровой стеганографии – встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ) с целью подтверждения данных						
2. Направление цифровой стеганографии – организация скрытого канала с целью сокрытия факта передачи						
В пространственной области	Наименее значащего бита К.Ю.Цветков, К.Матсуи, К.Танака, В.М.Коровин, С.Осборн, Дж.Фридрих	$\rho^1 = I + S$	$C^1_{стег} = \max$	$U^1 = \min$	$P_{ош} = 10^{-3}$, без сжатия	1
	Псевдослучайного интервала (Д.Рамкуман, Дж.Симонс, В.Волошиновский)	$\rho^2 = I + S I_h = 1$	$C^2_{стег} < C^1_{стег}$	$U^2 > U^1$	$P_{ош} = 10^{-3}$, без сжатия	1
	Псевдослучайной перестановки В.И. Коржик, С.Моллер, А.Фидманн, И.Стиран	$\rho^3 = I + S h = \phi_i$, ϕ_i – ПСП	$C^3_{стег} < C^2_{стег}$	$U^3 > U^2$	$P_{ош} = 10^{-3}$, без сжатия	1
	Блочного скрытия (В.О.Хорошко, О.Д.Азаров, К.Ю. Цветков, В.М.Коровин) <i>D-челюбков</i>	$\rho^4 = \left(\frac{I}{D}\right) + S$	$C^4_{стег} \approx C^3_{стег}$	$U^4 > U^3$	$P_{ош} = 10^{-3}$, без сжатия	1
	Наименее значащего бита В.Г.Грибунин, К.Ю.Цветков, В.М.Коровин, Е.Кох	$\rho^5 = I^{ДКП} + S$	$C^5_{стег} = \max$	$U^5 > U^1$	$P_{ош} = 10^{-3}$, без сжатия	1
В частотной области	Относительной замены В.И. Коржик, Е.Кох, Дж. Жао.	$\rho^6 = \begin{cases} S_0, \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_1 - \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_2 > P \\ S_1, \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_1 - \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_2 < P \end{cases}$, <i>P-прог</i>	$C^6_{стег} < C^4_{стег}$	$U^6 \approx U^4$	$P_{ош} = 10^{-3}$, в процессе сжатия	1
	Бенгама-Меммона (Д.Бенгам, Н.Меммон, Б-Л Эо, М. Юнг)	$\rho^7 = \begin{cases} S_0, \left\{ \begin{aligned} \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_3 < \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_1 \\ \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_3 < \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_2 \end{aligned} \right. \\ S_1, \left\{ \begin{aligned} \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_3 > \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_1 \\ \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_3 > \left(\frac{I^{ДКП}}{D}\right)_2 \end{aligned} \right. \end{cases}$	$C^7_{стег} < C^6_{стег}$	$U^7 > U^6$	$P_{ош} = 10^{-3}$, в процессе сжатия	1
	Фридрих Е.А.Небаева, Дж. Фридрих	$\rho^8 = (I)^{ДКП} + S \left[(I')^{ДКП} < (I)^{ДКП} + 10^2 a \right]$, I' – модифицированные видеоданные, a – пороговая функция	$C^8_{стег} < C^7_{стег}$	$U^8 \approx U^7$	$P_{ош} = 10^{-3}$, в процессе сжатия	1
	Расширения спектра К.Ю.Цветков, А.Е.Коревых, В.М.Коровин, Дж.-Р. Смит, В.О.Комиски	$\rho^9 = (I)^{ДКП} + S \cdot \phi_i$, ϕ_i – ПСП	$C^8_{стег} < C^9_{стег} < C^1_{стег}$	$U^9 \approx U^8$	$P_{ош} = 10^{-3}$, в процессе сжатия	1
	Статистический (И. Патис, В.О.Хорошко, В.Г.Грибунин, М.Е. Шелест)	$\rho^{10} = \left[(I)_1^{ДКП} \right]^{\frac{E}{2}} \cup \left[(I)_2^{ДКП} \right]^{\frac{E}{2}}$, E – энергия изображения	$C^{10}_{стег} < C^9_{стег}$	$U^{10} > U^9$	$P_{ош} = 10^{-3}$, в процессе сжатия	1

Развитие методов встраивания как в пространственной, так и в частотной области шло, как правило, по пути усложнения правила встраивания и поиска функций для выбора бит, подлежащих замене, который максимально похож на случайную величину. В работе [1] в качестве альтернативных методов замены указаны следующие методы.

Встраивание путем инверсии бита: «1» может соответствовать замена 0>1, «0» – замена 1>0.

Встраивание путем вставки бита непосредственно перед модифицируемым битом, при этом значение бита ЦВЗ должно быть противоположно значению бита контейнера.

Встраивание удалением бита, для этого выбирают пары битов «01» или «10» битов, которые соответствуют разным значениям бита ЦВЗ. Затем первый бит пары удаляется.

Встраивание с использованием бита-флага, суть которого состоит в том, что очередной бит контейнера (неизменяемый) является битом ЦВЗ, на что указывает инверсия предшествующего бита-флага.

Встраивание с применением пороговых бит: используется бит-флаг, но одному биту ЦВЗ соответствует несколько идущих следом за флагом бит (нечетное число). Если среди этих бит больше единиц, то бит ЦВЗ равен «1».

Встраивание с использованием табличных значений. Для определения бита ЦВЗ в предыдущем методе фактически использовалась проверка на четность. С тем же успехом можно было бы применять и любое другое отображение множества бит в 1 бит либо находить его значение по таблице. Возможно использование динамически изменяемой таблицы, когда таблица изменяется на каждом шаге или выбор значения из таблицы осуществляется псевдослучайно. Так как табличные значения (биты контейнера) знает и кодер и декодер, то их можно не передавать (косвенная динамическая таблица).

Встраивание с применением функции, оценивающей статистику изображения и корреляционные связи между элементами изображения, и последующее применение этой функции для каждого элемента изображения для определения стегапути. При этом в качестве функции может быть использована ПСП.

Другим подходом, отличным от первых двух, является встраивание дополнительной информации за счет энергетической разницы между коэффициентами контейнера, характеризующееся малым изменением статистики изображения.

Отдельной классификационной группой среди стегометодов является организация ЦВЗ и стегоканалов с использованием шумоподобных сигналов (ШПС) [7, 10, 14–16], их также называют методами с расширением спектра. При этом модификации подлежит всё изображение целиком, в отличие от встраивания в частотную и пространственную области, где замене подлежат лишь те элементы и коэффициенты, к которым наименее чувствительна система зрения человека и изменение статистики изображения.

ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДАХ

Для поиска модифицируемых элементов контейнера или для модуляции и кодирования встраиваемых данных в стегометодах, как правило, используют псевдослучайные последовательности (ПСП), в том числе в методах с применением ШПС. При этом к ПСП предъявляют следующие основные требования:

- 1) непредсказуемость появления знаков 1 и 0, благодаря чему спектр сигнала становится более равномерным, а определение алгоритма формирования ПСП по ее участку ограниченной длины – невозможным;
- 2) хорошие корреляционные свойства ПСП, которые описываются автокорреляционной и взаимокорреляционной функциями;
- 3) наличие большого набора разных ПСП одинаковой длины для построения систем с кодовым разделением каналов.

Чем более хаотична и непредсказуема сгенерированная ПСП, тем ближе ее характеристики к белому шуму. В связи с этим задача генерации таких ПСП весьма актуальна, в том числе в интересах стеганографии.

Наряду с общеизвестными способами формирования ПСП развитие получили и другие подходы, изложенные ниже, которые все чаще находят применение в цифровой и компьютерной стеганографии [17].

1. Использование для генерации ПСП многозначных последовательностей с установлением нелинейных законов их формирования, например, базисных функций Виленкина – Крестенсона, представляющих собой обобщение для дискретно-экспоненциальных функций и функций Уолша. Их применение позволяет получать ПСП значительной структурной скрытности, при этом существует возможность построения ортогональной системы функций с хорошими автокорреляционными и взаимокорреляционными свойствами [12, 14–16, 18, 19].

2. Построение генератора случайных чисел (ГСЧ), генерирующих приближенные к истинно случайным числовые последовательности [17]. С этой целью в качестве источника случайности ГСЧ используют физические процессы. В данном направлении наиболее актуальными вопросами являются вопросы детерминированного хаоса и его использования в системах связи. Современное развитие исследований в области извлечения хаотичности из среды с целью формирования начального условия для работы ГСЧ характеризуется использованием в качестве источника хаотичности более чем одной физической среды одновременно. Например, метод, рассмотренный в работе [20], заключается в том, что полезный сигнал кодируют в двоичный код, формируют посредством первого генератора исходный детерминированный хаотический сигнал путем модуляции параметров хаотического сигнала полезным цифровым сигналом и передают полученный сигнал по каналу связи принимающей стороне, где его делят на два идентичных сигнала, которыми воздействуют на второй и третий генераторы.

3. Разработка методов повышения качества ГСЧ на основе формализованных моделей дискретных отображений класса «клеточный автомат», которые на основе простых правил, могут порождать сложное поведение [17, 21].

4. Поиск ПСП на основе «естественно» существующих бесконечных числовых последовательностей (иррациональных чисел, которые могут быть оценены как «непознанные» с точки зрения применения в связи) и конечных последовательностей ограниченного числа объектов (геномные последовательности, также «непознанные» с точки зрения применения в связи, которые для многих объектов живой природы известны) [17, 22].

5. Формирование фрактальных ПСП, которые совместно с ультракороткими сверхширокополосными сигналами позволяют получить новый вид сигналов – фрактальные сверхширокополосные сигналы [17]. По мнению авторов, развивающих это направление в работах [23, 24], из-за широкой полосы частот СШПС переносят гигантские объемы информации, что определяет их успешное применение в открытых каналах связи для передачи информации на небольшие расстояния (в пределах учреждения), совместно с фрактальным принципом построения возможно обеспечение и информационной безопасности передаваемой таким образом информации.

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СТЕГАНОГРАФИИ

Анализ открытых публикаций в области стеганографии позволяет говорить о формировании новых направлений и тенденций. Как правило, совершенствование стегометодов идет по пути повышения скрытности либо увеличения скрытой пропускной способности [25–28]. Представленные ниже методы ориентированы на организацию стегосистем с новыми возможностями. Перечислим основные из них.

1. Выбор в качестве контейнеров цифровых объектов неаналоговой природы: организация стегосистемы в исполняемых файлах, например, сокрытие данных предлагается использовать при помощи замены инвариантных команд или порядка их следования таким образом,

что программа функционирует без изменений [29], использование аппаратных стега-контейнеров с LUT-ориентированной архитектурой [30] в кодах, исправляющих ошибки [31].

2. Разработка методов встраивания ЦВЗ и стегаканалов, устойчивых к кодированию источника (сжатию): разработка таких методов, которые позволяли бы с заданной достоверностью идентифицировать ЦВЗ или извлекать скрываемые данные на приемной стороне, встраиваемые до проведения процедур сжатия контейнера на передающей стороне. В работах [8, 9, 13–16, 18, 19, 32, 33] предложено достичь требуемых значений качества встраиваемых данных за счет использования сигнальных конструкций большой избыточности, применяемых для кодирования и модуляции скрываемой информации.

3. Разработка стегаметодов, ориентированных на передачу информации по световым волноводам [34].

4. Разработка методов, ориентированных на модификацию аналоговой природы контейнера, а именно – встраивание в длину волны. Авторы метода [35–37] исходят из того, что любые вмешательства в пространственное, частотное или энергетическое представление контейнера приводит к скачкообразному изменению длин волн контейнера. Путем встраивания в аналоговую природу с учетом этих особенностей будет позволено достигать, по мнению авторов, повышения скрытности стегавложений.

5. Создание многоканальных стегосистем и стегосетей, их унификация и стандартизация. Так, в работах [8, 9, 13, 18, 19, 32, 33, 38] предложен метод уплотнения скрытого канала в видеоданных, что позволяет формировать многоканальную стегосистему. Авторы достигают заявленный результат за счет кодового уплотнения скрываемых данных. В работе [39] предложено пространственно-временное разделение стегаканала.

В статье [40] опубликовано предложение формализовать взаимодействие абонентов стеганографической системы связи в виде многоуровневой эталонной модели взаимодействия стеганографических систем – ЭМВСС. Автор надеется, что такая модель позволит обобщить, систематизировать и унифицировать имеющийся опыт в области стеганографии, а в дальнейшем – развивать направление создания единой формализованной модели стегосистемы как одного из вариантов реализации системы скрытой передачи сообщений, наложенной на телекоммуникационную систему связи.

6. Работы, направленные на совершенствование методов передачи заполненных стегаконтейнеров с целью снижения демаскирующих факторов. Основная идея такого подхода состоит в том, что для уменьшения вероятности перехвата скрытно передаваемых данных следует снижать до минимума время нахождения контейнеров в сети и использовать множество каналов передачи данных, тем самым снижая частоту их демонстрации [41–43].

7. Разработка согласованных методов сжатия изображения и встраивания/извлечения скрываемых данных (стегаметодов). Авторы работы [44] предлагают использовать для сжатия видеоданных принципы, отличные от общепризнанных. При этом метод сжатия должен быть согласован с методом встраивания стегавложений. Так, для сжатия контейнера и встраивания стега используется фрактальный подход. Метод включает этапы: формирования вектора параметров сжатия изображения, ввода скрываемой информации, выделения доменов и ранговых областей, соотнесения ранговых областей и доменов, формирования конечного архива. В способе на этапе выделения доменов и ранговых областей мощность пикселей домена корректируется с учетом значения скрываемых бит информации.

8. Разработка стегаметодов, ориентированных на управление сформированными скрытыми каналами. Авторами работ заявлена возможность управления скрытой пропускной способностью, перераспределения ее в зависимости от приоритета абонента и качества обслуживания, предъявляемого к стегаканалу [13, 45, 46]. Метод позволяет достичь новых возможностей для потребителей услуг скрытого обмена, а также говорить о реальной возможности организовать стеганографические сети в перспективе.

9. Разработка генетических алгоритмов в стеганографии [22, 47]. В работе [22] предложен стегометод, предполагающий изменение оцифрованных коэффициентов ДКП изображения битом (или битами) встраиваемой информации. Генетический алгоритм применяется на этапе выбора наиболее подходящего способа изменения коэффициентов ДКП блока изображения при внедрении в него бита дополнительной информации. Формирование исходной популяции хромосом осуществляется псевдослучайным образом в окрестности исходных значений коэффициентов ДКП. Затем авторы проводят оценивание приспособленности хромосом в популяции по функции приспособленности, которая принимает значение «0» в случае несоответствия генам используемых для модификации значений коэффициентов ДКП. В противном случае значение функции приспособленности должно определяться на основе вносимых в изображение искажений, вызванных соответствующим данной хромосоме изменением коэффициентов ДКП. Если для хромосомы значение функции приспособленности окажется равным нулю, то ее заменяют на вновь сгенерированную, после чего значение функции для нее пересчитывается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стеганографическая наука является актуальной областью для исследования, как с точки зрения обеспечения безопасности информации, так и с точки зрения защиты персональных данных и авторских прав. Проводимые в настоящее время исследования в сфере цифровой и компьютерной стеганографии весьма разнообразны и направлены как на совершенствование характеристик стеговложений, так и на возможность создания новых методов с использованием передовых достижений из различных отраслей знаний, открывающих новые перспективы для потребителей услуг связи.

Список используемых источников

1. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 272 с.
2. Стеганография, цифровые водяные знаки и стегоанализ: монография / А.В. Аграновский, А.В. Балакин, В.Г. Грибунин, С.А. Сапожников. – М.: Вузовская книга, 2009. – 220 с.
3. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. – К.: МК-Пресс, 2006. – 288 с.
4. Пономарёв К.И., Путилов Г.П. Стеганография: история и современные технологии: монография. – М., 2009. – 70 с.
5. Алиев А.Т. Разработка моделей, методов и алгоритмов перспективных средств защиты информации в системах электронного документооборота на базе современных технологий скрытой связи: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.19. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. – 216 с.
6. Мерзлякова Е.Ю. Построение стеганографических систем для растровых изображений, базирующихся на теоретико-информационных принципах: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.19. – Новосибирск: СибГУТИ, 2011. – 161 с.
7. Жгун А.В. Модель скрытой передачи информации в каналах связи: дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.18. – В. Новгород: НовГУ, 2003. – 187 с.
8. Абазина Е.С. Метод скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Информация и космос. – 2014. – №4. – С. 33–38.

9. Модель кодера скрытых каналов с кодовым уплотнением с использованием сигнальных последовательностей Франка – Уолша, Франка – Крестенсона / К.Ю. Цветков, В.Е. Федосеев, В.М. Коровин, Е.С. Абазина // Труды НИИР. – 2014. – №4. – С. 2–11.
10. Небаева К.А. Разработка необнаруживаемых стегосистем для каналов с шумом: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. – СПб.: СПбГУТ, 2014. – 176 с.
11. Коржик В.И. Курс лекций по стеганографии. – URL: http://www.mtskafedr/ibts/korskik_lections20091220_sg.rar (дата обращения: 20.09.2016).
12. Цветков К.Ю., Федосеев В.Е., Абазина Е.С. Применение двумерных нелинейных сигналов Франка – Уолша, Франка – Крестенсона в методе формирования скрытых каналов с кодовым уплотнением в структуре сжимаемых видеоданных // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2013. – Вып. 4. – С. 32–40. – URL: <http://hes.ru/ru/citation-ru/2013.html#4> (дата обращения: 20.09.2016).
13. Абазина Е. С., Ерунов А. А. Результаты моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 2. – С. 1–25. – URL: journals.intelgr.com/sccs/20152/html (дата обращения: 20.09.2016).
14. Цветков К.Ю. Методы цифровой стеганографии и их приложения в сетях спутниковой связи // Сборник трудов II ВНК Космических войск. – 2004. – СПб.: МО РФ. – Т.2. – С. 344–349.
15. Цветков К.Ю., Ефимов С.Н., Остахов И.Т. Защита инфокоммуникационных систем и сетей специального назначения: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 160 с.
16. Коровин В.М. Метод и алгоритмы встраивания широкополосных цифровых водяных знаков в сжатые изображения // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Особенности развития космической отрасли России и перспективы ее дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей». – СПб.: БГТУ, 2007. – С. 175–178.
17. Информационная безопасность: методы шифрования / под ред. Е.М. Сухарева. – М.: Радиотехника, 2011. – Кн.7. – 208 с.
18. Абазина Е.С. Алгоритмы внедрения двумерных нелинейных кодовых последовательностей в видеопоток // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2013. – Вып. 1. – С. 85–93.
19. Абазина Е.С. Применение систем ортогональных сигналов для организации скрытого канала при передаче информации с кодовым уплотнением // Техника средств связи. – 2014. – №3. – С.221–224.
20. Пат. 2 509 423, Российская Федерация, МПК H04L 9/00, G06F 21/60. Способ скрытой передачи информации / Москаленко О.И., Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е.; заявитель и патентообладатель Саратовский гос. ун-т им. Н.Г. Чернышевского. – 2012118774/08; заявл. 04.05.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7.
21. Асосков Г.А., Тихоненко Е.А. Новый генератор случайных чисел на базе двумерного клеточного автомата // Математическое моделирование. – 1996. – С. 77–84.
22. Коваленко М.П. Генетические алгоритмы в стеганографии. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskie-algoritmy-v-steganografii.pdf> (дата обращения: 20.09.2016).
23. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. – М.: Логос, 2002. – 664 с.
24. Шелухин О.И., Тенякиев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.
25. Разинков Е.В., Латыпов Р.Х. Стойкость стеганографических систем // Ученые записки Казанского гос. ун-та. Физ.-мат. науки. – 2009. – Т. 151, кн. 2. – С. 126–132.

26. *Ремизов А.В., Филиппов М.В.* Оценка необнаружимости стеганографических алгоритмов // Наука и образование. – 2012. – № 3. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/359383.html> (дата обращения: 17.04.2014).
27. *Кувшинов С.С.* Методы и алгоритмы сокрытия больших объемов данных на основе стеганографии: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.19. – СПб.: НИУ ИТМО, 2010. – 116 с.
28. *Разинков Е.В.* Математическое моделирование стеганографических объектов и методы вычисления оптимальных параметров стегосистем: дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.18. – Казань: КГУ, 2012. – 109 с.
29. *Нечта И.В.* Стеганография в файлах формата Portable Executable // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т. 7, № 2. – С. 73–78.
30. *Защелкин К.В.* Метод стеганографического скрывания данных в LUT-ориентированных аппаратных контейнерах электротехнических и компьютерных систем. – Одесский национальный политехн. ун-т, 2013. – С. 83–90.
31. *Слипенчук П.В.* Стеганография в кодах, исправляющих ошибки // Наука и инновации. – М.: Изд-во Московского гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2013. – С. 35
32. *Абазина Е.С.* Метод кодового уплотнения скрытого канала при передаче видеоданных // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 3. – С. 14–42. – URL: <http://journals.intelgr.com/scs/20153/html> (дата обращения: 20.09.2016).
33. *Абазина Е.С.* Формирование стеганографического канала с кодовым уплотнением на основе двумерных нелинейных сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2015. – Вып. 2. – С. 108–118.
34. *Колесников М.В.* Метод скрытой передачи данных в оптическом канале видеоданной // Инженерный вестник. – 2013. – № 2. – С. 4.
35. Пат. 2 467 486, Российская Федерация, МПК H04L 9/00. Способ встраивания сжатого сообщения в цифровое изображение / Захаркин С.В., Юрлов А.В., Болбенков А.В., Кирюхин Д.А., Коньшев М.Ю., Люлин А.Н.; заявитель и патентообладатель Акад. Фед. службы охраны России. – №2011133408/08; заявл. 09.08.2011.; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32.
36. Пат. 2 407 216, Российская Федерация, МПК H04N 7/08, H04L 9/00. Способ встраивания сообщения в цифровое изображение / Захаркин С.В., Иванов И.В., Кирюхин Д.А., Воропаев М.В., Болбенков А.В.; заявитель и патентообладатель Акад. Фед. службы охраны России. – №2009124873/09; заявл. 29.06.2009; опубл. 20.12.2010, Бюл. № 35.
37. Пат. 2 530 339, Российская Федерация, МПК H04N 19/46, H04N 19/90, H04L 9/00. Способ встраивания информации в изображение, сжатое фрактальным методом, на основе сформированной библиотеки доменов / Двилянский А.А., Кирюхин Д.А., Снарлов М.М., Еменка К.Г., Чириков В.Е., Трапашко В.С., Швытов К.В., Чурбанов А.Н., Иванов И.В.; заявитель и патентообладатель Акад. Фед. службы охраны России. – №: 2013123329/08; заявл. 21.05.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
38. *Алексеев А.П., Макаров М.И.* Принципы многоуровневой защиты информации // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 88–93.
39. *Макаренко С.И., Блатов И.А., Макаров М.И.* Эталонная модель взаимодействия стеганографических систем и обоснование на ее основе новых направлений развития теории стеганографии // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – №2(3). – С. 24–32.
40. *Алексеев А.П.* Оценка вероятности обнаружения мультимедиаcontainers при пространственно-временном распылении информации // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 11, № 3. – С. 91–95.
41. Пат. 2 462 825, Российская Федерация, МПК H04L 9/00. Способ скрытой передачи зашифрованной информации по множеству каналов связи, с учетом мощности пикселей домена / Алексеев А.П., Макаров М.И.; заявитель и патентообладатель Поволжский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – 2011128561/08; заявл. 08.07.2011; опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27.

42. *Макаров М.И.* Разработка и исследование методов скрытой распределенной передачи сеансовых данных в телекоммуникационных сетях: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.12.13. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 144 с.
43. Пат. 2 546 558, Российская Федерация, МПК G06T 5/10, H04L 9/06. Способ встраивания информации в изображение, сжатое фрактальным методом, с учетом мощности пикселей домена / Иванов В.А., Двилянский А.А., Кирюхин Д.А., Снарков М.М., Еменка К.Г., Чириков В.Е., Иванов И.В.; заявитель и патентообладатель Акад. Фед. службы охраны России. – №013125616/08; заявл. 03.06.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
44. *Ерунов А.А., Квасов М.Н.* Метод скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных при блочном делении I – кадров // Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 4–5.
45. *Федосеев В.Е., Абазина Е.С., Ерунов А.А.* Распределение пропускной способности скрытого канала связи, организованного методом цифровой стеганографии // Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 10–13.
46. *Дрюченко М.А.* Статистические и нейросетевые алгоритмы синтеза и анализа стеганографически скрытой информации в аудио- и графических данных: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.17. – Воронеж: ВГУ, 2010. – 192 с.

К.Л. Григорьев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Ю. Кулаков
КБ «Арсенал» имени М.В. Фрунзе;
С.А. Осипенко,
кандидат техн. наук;
А.Н. Павлов,
доктор техн. наук, доцент;
А.А. Слинько

ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В рамках теории проактивного управления структурной динамикой сложных объектов актуальным является рассмотрение проблем повышения структурной и функциональной устойчивости целевого применения космических аппаратов (КА) с целью увеличения сроков их активного существования. В статье рассмотрен подход к исследованию структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов на примере исследования системы управления движением КА, а также представлена практическая реализация разработанного подхода.

Ключевые слова: система управления движением космического аппарата, бортовые средства космического аппарата, проактивное управление, геном структуры, критичность отказов, структурно-функциональная реконфигурация.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе функционирования КА подвержены воздействию различных внешних возмущений. Как показывает опыт эксплуатации космических систем, существенное ухудшение показателей качества функционирования КА связано с отказами бортовых средств (БСр) системы управления движением КА, которыми являются чувствительные элементы (звездные датчики, измерители угловой скорости и т.п.) и исполнительные органы – двигательные установки различных типов. Поэтому особое внимание следует уделять повышению устойчивости функционирования КА и соответственно увеличению сроков его активного существования при отказах БСр. Для обеспечения необходимого уровня устойчивости КА требуется введение различного рода избыточности: структурной (резервные элементы), функциональной (способность КА перераспределять функции), информационной, временной. Кроме того, возникает необходимость реализации в системе управления движением механизмов компенсации внешних возмущений, значительно влияющих на точность ориентирования КА. Например, практика проектирования систем управления движением (СУД) перспективных КА показывает, что введение избыточности связано с особенностями работы чувствительных элементов (ЧЭ) – засветкой блока определения координат звезд (БОКЗ) Солнцем и Луной, невозможностью работы прибора ориентации по Земле (ПОЗ) при произвольной ориентации.

На практике при решении задач обеспечения устойчивости сложных систем, а также ее составляющих – надежности, живучести и помехоустойчивости – в рамках развиваемой в настоящее время теории проактивного управления структурной динамикой [1] широкое распространение получил такой вариант управления структурой сложных систем, как структурно-функциональная реконфигурация. При этом на этапах проектирования и создания КА должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций и структур, а также внесен такой уровень избыточности в указанные множества, при которых на этапе применения КА по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчетные и нерасчетные нештатные ситуации, вызывающие деградацию его структуры [2, 3].

Поэтому для учета различного рода воздействий целесообразно при описании структурной динамики СУД КА обеспечить решение задачи управления ее структурно-функциональной реконфигурацией.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СУД КА

При исследовании сложных объектов, как правило, выделяют функциональные, технологические, технические, топологические и организационные структуры. Следует отметить, что функциональные и технологические структуры, определяющие порядок выполнения системой отдельных функций, решение последовательности задач и комплекса операций, позволяющих достичь требуемого положительного эффекта или целей управления, имеют первостепенное значение среди остальных структур. Так, для СУД КА главными задачами являются ориентация, стабилизация и проведение маневра. Далее при изложении предлагаемого подхода будем рассматривать подсистему ориентации СУД КА.

БСр СУД решают задачу ориентации КА, которая может реализовываться разными структурными схемами. Причем, наряду со структурной избыточностью, у СУД присутствует функциональная избыточность – например, текущее угловое положение можно получить как прямыми измерениями с БОКЗ, так и используя интегрирование скорости из бортового измерителя угловых скоростей (БИУС). Как правило, анализ структур сложных объектов осуществляется с использованием общего логико-вероятностного метода [5]. На его основе реализуются построение схемы функциональной целостности (СФЦ) и расчет векторных оценок свойства критичности отказов элементов объекта с использованием количественных и качественных показателей [4–6], которые позволяют выявить множество критичных элементов. СФЦ системы ориентации КА, состоящей из четырех приборов БОКЗ, четырех приборов ПОЗ и трех БИУС для проведения режимов точной или грубой ориентации, показана на рис. 1.

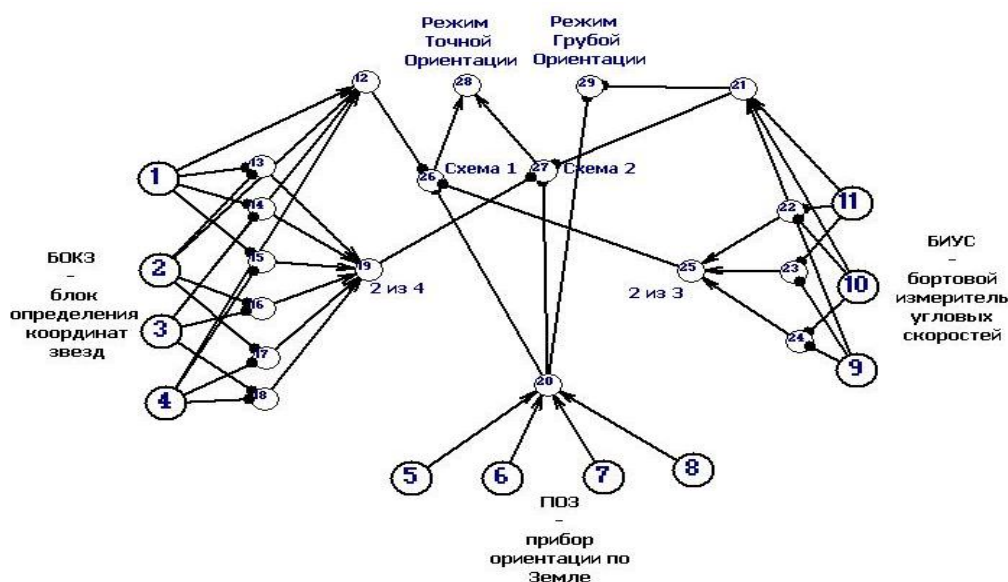


Рис. 1. СФЦ системы ориентации КА

Проведенный в работах [6–8] анализ современных методов исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур сложных объектов с позиции логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов позволил предложить оригинальную концепцию обобщенного генома структурного построения системы. Под геномом структуры понимается вектор $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты

полинома $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ отказа структуры, составленной из однородных элементов. С одной стороны, геном хранит в концентрированном виде структурные свойства объекта. С другой стороны, в серии научных работ [6–8] показано, как, используя геном структуры, можно вычислить значения показателей структурной устойчивости системы, оценить вклады БСр в показатель структурной устойчивости СУД КА, которые можно использовать для оценки критичности их отказов. Отказы различных БСр СУД КА могут приводить к разным по степени их влияния на состояние системы последствиям. Это обусловлено не только их структурным построением, но и частотой их взаимного участия в технологических операциях управления КА. С целью определения роли конкретных БСр в обеспечении работоспособности КА следует проводить анализ показателей интенсивности и равномерности их применения при выполнении тех или иных целевых задач.

Для анализа интенсивности и равномерности применения БСр КА предлагается использовать подход, предложенный в работах [9, 10], подразумевающий описание сложных систем в виде специальных модельных гиперграфов и вычисления их производных. Использование предложенного подхода и результатов работы [12] позволяет проводить анализ структурно-функциональных свойств СУД КА и вычислять различные показатели: интенсивности применения БСр в тех или иных технологических процессах, совместности участия БСр в различных технологических циклах управления, функциональной живучести подсистемы ориентации СУД КА. В качестве показателя функциональной живучести подсистемы ориентации СУД КА используется показатель децентрализации графа транзитивного замыкания отношения технологической независимости БСр СУД, так как более децентрализованная структура обладает высокими адаптационными способностями – функциональной гибкостью. Рассматриваемые в статье технологические режимы ориентации космического аппарата приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические режимы ориентации КА

Технологические режимы	БОКЗ				ПОЗ				БИУС		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Режим «грубая ориентация»	0	0	0	0	1 из 4х				1 из 3х		
Режим «точная ориентация» (схема 1)	1 из 4х				1 из 4х				2 из 3х		
Режим «точная ориентация» (схема 2)	2 из 4х				1 из 4х				1 из 3х		
Режим выдачи импульса (вариант 1)	1 из 4х				1 из 4х				1 из 3х		
Режим выдачи импульса (вариант 2)	2 из 4х				0	0	0	0	1 из 3х		
Режим сеанса связи с НКУ	1 из 4х				0	0	0	0	1 из 3х		
Режим «сброс телеметрии»	1 из 4х				0	0	0	0	1 из 3х		
Режим определения ориентации по звездам	1 из 4х				0	0	0	0	0	0	0

Приведенные показатели также можно использовать для оценки критичности отказов БСр СУД КА.

Поскольку современные сложные системы, в том числе и КА, содержат большое количество подсистем и элементов, в условиях ограниченных ресурсов обеспечить требуемую устойчивость системы путем совершенствования или резервирования одновременно всех элементов не представляется возможным. Однако ясно, что различные компоненты системы имеют различную важность, отказы элементов системы могут приводить к различным последствиям, как по степени влияния на структурное состояние системы, так и по степени влияния на качество выполнения задач по предназначению. Выявление критичных элементов

сложных систем позволяет сосредоточить усилия на совершенствовании элементов системы, имеющих ключевое значение в обеспечении устойчивости ее функционирования.

Учитывая вышесказанное и используя подход к оцениванию критичности отказов элементов сложных объектов на основе нечеткой логики и метода теории планирования эксперимента, изложенного в работе [11], было проведено оценивание критичности отказов БСр СУД КА, результаты которого представлены на рис. 2.

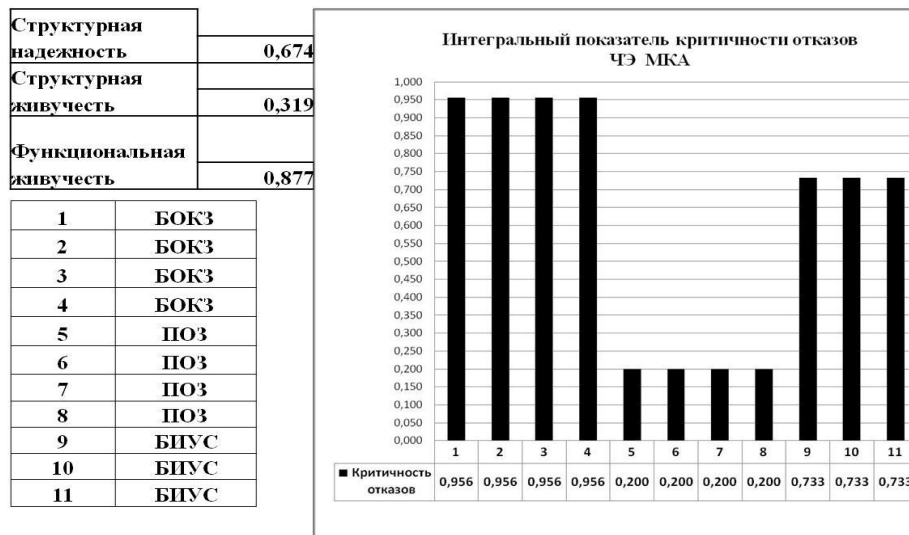


Рис. 2. Критичность отказов БСр СУД КА

Для успешного решения возложенных на КА задач необходимо не только определять критически важные элементы, воздействия на которые будут приводить к изменению структур, состояния, параметров, способов функционирования КА в различных условиях обстановки, но и осуществлять управление структурно-функциональной реконфигурацией СУД КА.

Реконфигурация сложного объекта, с одной стороны, направлена на изменение топологии системы, характеристик работоспособности ее технической подсистемы для ликвидации последствий различных деструктивных воздействий, с другой стороны, предполагает гибкое перераспределение выполняемых системой целей, задач и функций между работоспособными компонентами при учете допустимости функционирования объекта с ухудшенными в заданных пределах показателями качества. Следует отметить, что возникновение ситуаций, связанных со структурной динамикой СУД КА, может быть вызвано не только отказами БСр, но и плановой сменой режимов функционирования КА, приведенных в табл. 1. Это, в свою очередь, требует выработки решения по управлению структурно-функциональной реконфигурацией СУД КА.

ЗАДАЧА ВЫБОРА РАБОЧЕЙ КОНФИГУРАЦИИ СУД КА

Для проведения структурно-функциональной реконфигурации СУД КА при возникновении сбоев и отказов БСр для заданного режима функционирования КА требуется решить оптимизационную задачу выбора рабочей конфигурации СУД КА (1)–(4).

$$\frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$w(\vec{x}) \leq W_{МКА}, \quad (2)$$

$$R(\vec{x}) > 0, \quad (3)$$

$$\vec{x} = (x_1, \dots, x_n), x_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где $w(\vec{x})$ – мощность потребляемой электроэнергии рабочей конфигурацией СУД КА, задаваемой вектором \vec{x} ;

$W_{МКА}$ – допустимое суммарное энергопотребление на борту КА;

$R(\vec{x})$ – структурная надежность рабочей конфигурации СУД КА,

$$R(\vec{x}) = 1 - T(Q_1 \cdot x_1, \dots, Q_n \cdot x_n) \Big|_{Q_i=0.5};$$

c_i – коэффициент расходования временного ресурса i -го БСр,

$$c_i = \frac{T_i^p - \tau_i}{T_i^p};$$

T_i^p – гарантированное время наработки i -го БСр на отказ;

τ_i – суммарное время наработки i -го БСр.

С помощью критерия (1) обеспечивается равномерный расход временного ресурса БСр для увеличения срока активного существования КА. Следует отметить, что решение задачи (1)–(4) может использоваться не только для увеличения срока активного существования КА за счет равномерной загрузки БСр, но также для минимизации затрат бортовых ресурсов в процессе эксплуатации КА: электроэнергии, топлива, информационных ресурсов и т.д. Для решения задачи (1)–(4) по управлению структурно-функциональной реконфигурацией СУД КА предложен метод и реализующий его алгоритм [12], их новизна заключается в комбинированном использовании метода случайного направленного поиска и метода отсечений перспективных вариантов реконфигурации СУД КА типа «ветвей и границ». Для иллюстрации практического применения предлагаемого подхода к исследованию структурно-функциональной реконфигурацией СУД КА были проведены вычислительные эксперименты, их результаты приведены в табл. 2 и 3 (в табл. 2 – результаты «стандартной» реконфигурации БСр СУД КА, осуществляемой автоматически для парирования отказов БСр).

Таблица 2

Результаты применения «стандартной» реконфигурации

Режимы применения БСр	Схема 1	Схема 1	Схема 2	Схема 2	Конец САС
БОКЗ №1	7	1,4	1,0	0	
БОКЗ №2	6,4		6,4	5,4	0,7
БОКЗ №3	5,9			5,9	1,2
БОКЗ №4	6,8				
ПОЗ №1	6	0,4	0		
ПОЗ №2	7		7	6	1,3
ПОЗ №3	6,1				
ПОЗ №4	5,7				
БИУС №1	5,6	0			
БИУС №2	6	0,4	0		
БИУС №3	6,1	6,1	5,7	4,7	0
Время эксплуатации	0	5,6	6	7	11,7

В табл. 3 приведены результаты структурно-функциональной БСр СУД КА с использованием предлагаемого подхода. При этом интервал активного существования КА был разбит на три равных участка: от 0 до 2,5 ед., от 2,5 до 5 ед., от 5 до 7,5 ед., после каждого из которых проводится «принудительная» реконфигурация СУД КА путем решения задачи (1)–(4). На последующих интервалах активного существования КА проводится «стандартная» реконфигурация.

Таблица 3

Результаты структурно-функциональной реконфигурации

Режимы применения БСр	Схема 2	Схема 2	Схема 2	Схема 2	Схема 2	Схема 1			
БОКЗ №1	7	4,5	4,5	2	2	1,1	0		
БОКЗ №2	6,4	3,9		3,9	0,4			0,4	0
БОКЗ №3	5,9	5,9	3,4	0,9	0,9	0			
БОКЗ №4	6,8	6,8	4,3	4,3	0,8		0,8	0	
ПОЗ №1	6	3,5				3,5	2,4		
ПОЗ №2	7	7	4,5		4,5	3,6			
ПОЗ №3	6,1		6,1	3,6			3,6	2,8	2,4
ПОЗ №4	5,7			5,7	2,2				
БИУС №1	5,6	3,1				3,1	2	1,2	0,8
БИУС №2	6	6	3,5	3,5	0				
БИУС №3	6,1		6,1	3,5	3,5	2,6	1,5	0,7	0,3
Время эксплуатации	0	2,5	5	7,5	11	11,9	13	13,8	14,2

Проведенные вычислительные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что фактический срок активного существования КА при проведении структурно-функциональной реконфигурации БСр СУД КА может быть увеличен на 20% по сравнению с использованием «стандартной» реконфигурации, что подтверждает актуальность применения рассмотренного подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в статье подход к исследованию структурно-функциональной реконфигурации СУД КА имеет, наряду с важным теоретическим значением, большую прикладную значимость. Научная новизна полученных результатов базируется на оригинальной концепции генома структурного построения сложных объектов и операциях дифференцирования специальных гиперграфов технологических процессов. Основные аспекты предлагаемого подхода рассмотрены на примере анализа структуры СУД КА и критичности отказов БСр, входящих в ее состав, для решения оптимизационной задачи выбора рабочей конфигурации СУД КА. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что решение такой задачи обеспечивает увеличение срока активного существования КА за счет равномерной загрузки БСр СУД.

Список используемых источников

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

2. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 312 с.
3. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Б.Г. Волик, Б.Б. Буянов, Н.В. Лубков и др.; под ред. Б.Г. Волик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 296 с.
4. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
5. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / В.И. Поленин, И.А. Рябинин, С.К. Свиринов, И.А. Гладкова; под ред. А.С. Можаяева. – СПб.: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.
6. Осипенко С.А., Павлов А.Н. Исследование безопасности сложных технических объектов // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т.53, №11. – С. 27–31
7. Павлов А.Н., Павлов Д.А. Подход к прогнозированию структурной устойчивости сложных объектов // Т-Сomm – Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Вып. № 6. – С. 65–67
8. Павлов А.Н., Соколов Б.В., Осипенко С.А. Обобщенный алгоритм формирования классов структурных состояний информационных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. – М.: «ПолиПринтСервис», 2009. – №. 4. – С. 3–8.
9. Горбатов В.А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. – М.: Наука. Физматлит, 2000. – 544 с.
10. Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В. Дискретная математика: учебник для студентов вузов. – М.: АСТ «Астрель», 2003. – 447 с.
11. Kopytov E.A., Pavlov A. N., Zelentsov V.A. New methods of calculating the Genome of structure and the failure criticality of the complex objects' elements // Transport and Telecommunication. – 2010. – Vol. 11, № 4. – P. 4–13.
12. Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Павлов Д.А. Функциональная реконфигурация чувствительных элементов системы управления движением КА // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. №5 – С. 169–181.

В.С. Забузов,
кандидат техн. наук;
Д.И. Казанцев

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Сформулирована задача повышения оперативности мониторинга инфотелекоммуникационной сети. Предложена методика повышения оперативности определения технического состояния инфотелекоммуникационной сети, основанная на информационно-временной модели сети и генерации динамической программы мониторинга.

Ключевые слова: инфотелекоммуникационная сеть, повышение процесса мониторинга, МІВ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время информационные технологии широко используются во всех отраслях деятельности человека для автоматизированного управления, оперативной обработки, хранения и передачи информации и др.

С научной точки зрения современная информационно-телекоммуникационная инфраструктура является сложной целеустремленной системой, состоящей из совокупности подсистем и элементов с определенными связями между ними. Сбой, нарушения работы могут негативно сказаться на функционировании как элемента, так и всей системы в целом. Для предотвращения нарушений в работе используют различные диагностические, профилактические и аналитические средства, в частности системы мониторинга сети [1].

Основной задачей систем мониторинга является оперативное обнаружение аномальных состояний инфотелекоммуникационной сети (ИТКС), влияющих на прохождение трафика. В свою очередь, аномальные состояния ИТКС могут быть следствием ряда событий, таких как изменения конфигурации, отказы оборудования, перегрузки и несанкционированные воздействия.

ИТКС как объект мониторинга представляет собой совокупность объектов мониторинга, каждый из которых обладает набором параметров. В свою очередь, каждый параметр может принимать некоторые значения в определенном диапазоне. Эти значения могут изменяться с течением времени. При возникновении аномальных ситуаций на всех элементах объекта именно от эффективности работы системы мониторинга будут зависеть своевременность и качество их восстановления [2, 3].

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

В результате проведенного анализа рассмотрены вопросы организации процесса мониторинга компьютерных сетей [7], разработки математического обеспечения активного мониторинга сети, учитывающего нестационарность наблюдаемых в сети процессов [8], проектирования архитектуры систем обнаружения аномалий компьютерных сетей [9], использования проактивного управления объектами для оперативного реагирования и последующего недопущения возможных нештатных и аварийных ситуаций с применением прогнозирования состояний сети [10], а также методы быстрого отсева рабочих станций, предотвращения зависания, сокращения времени опроса сети [11, 12].

Существующие системы мониторинга [1], [4–6] позволяют собирать большое количество данных, в основном это статичная информация в рамках сбора и обработки конкретных параметров определенных подсистем и элементов. Выделяют системы, выполняющие различные виды мониторинга, такие как активный, пассивный проактивный, реактивный и зонтичный [5]. На основе информации, собранной системой мониторинга, делается вывод о техническом состоянии ИТКС. При нарушении функционирования сети и ее элементов принимается решение либо о выдаче управляющих воздействий, либо о ремонте или замене некоторых элементов сети. Иными словами, в процессе эксплуатации система мониторинга является основным источником информации, необходимой для восстановления нормального состояния сети.

В связи с большим количеством элементов в ИТКС представляется актуальным решение задачи повышения эффективности функционирования целенаправленных процессов в виде аналитического инструмента, позволяющего выявлять аномалии, осуществлять прогнозирование вероятности наступления событий, с целью поддержки принятия решения по их устранению (или минимизации). При этом необходимо оптимизировать количество собираемых признаков.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для выявления сетевых аномалий обычно пытаются использовать различные параметры, извлекаемые из сетевого трафика: абсолютные величины показателей интенсивности во времени, отдельные значения полей сетевых пакетов, значения счетчиков, хранящихся в базах Management Information Base (MIB, база управляющей информации) [13]. Есть также попытки выделения из трафика логических образований – сетевых потоков.

Для мониторинга, определения и прогнозирования сетевых аномалий предлагается в качестве собираемых параметров использовать переменные MIB. Использование переменных MIB позволяет производить централизованный сбор только требуемых данных о состоянии удаленных сетевых устройств, каналов связи, хостов; охватывать различные уровни сетевого взаимодействия; получать данные непосредственно с наблюдаемого сетевого устройства.

Для определения технического состояния ИТКС и локализации неисправности, а также принятия решения по устранению причины и последствий неисправности посредством системы мониторинга необходимо собрать информацию о состоянии вычислительной сети путем опроса сетевых устройств и получения от них значений MIB-параметров, все множество которых обозначим как $\Lambda = \{\lambda_{i,j}\}$, где λ_{i,j_k} – j -й параметр с номером i -го сетевого устройства. Таким образом, если в сети функционируют n сетевых устройств, то общее количество всех параметров составляет

$$|\Lambda| = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \lambda_{i,j},$$

где l_i – количество параметров i -го сетевого устройства.

Каждый наблюдаемый параметр вычислительной сети привносит свою долю информации, выражающуюся в уменьшении энтропии сети как степени неопределенности ее технического состояния.

Пусть задано множество технических состояний ИТКС $V = (v_1, v_2, \dots, v_k)$. В результате обучения или по имеющейся априорной информации для каждого i -го технического состояния ИТКС определено его изображение (образ) $v_i = (\gamma_{i,1}, \gamma_{i,2}, \dots, \gamma_{i,n})$. Элементами $\gamma_{i,j}$ образа v_i являются обозначения наиболее вероятных исходов запросов параметров $\lambda_{i,j}$ в i -м техни

техническом состоянии ИТКС или так называемые «модельные» исходы проверок значений параметров в данном состоянии. Путем сопоставления признаков $\gamma_{i,j}$ с реально получаемыми исходами проверок значений параметров производится идентификация истинного состояния ИТКС с одним из заданных технических состояний v_i .

Кроме этого введем множество S всех подмножеств множества технических состояний ИТКС, т.е. булеан множества V . Каждый элемент множества S , который назовем состоянием S_k , будет включать в себя одно или несколько состояний ИТКС или же будет пустым множеством.

Предположим, что для каждого i -го технического состояния ИТКС найдена соответствующая вероятность $P(v_i)$, т.е. вероятность пребывания ИТКС в состоянии, принадлежащем i -му классу, или просто вероятность i -го класса. Под i -м классом понимается определенный вид технического состояния ИТКС, в том числе и неработоспособное ее состояние, обусловленное отказом оборудования, сбоем программного обеспечения и др. Выражение «ИТКС находится в состоянии, принадлежащем i -му классу» равносильно выражению «ИТКС находится в i -м техническом состоянии», а поэтому вероятность $P(v_i)$ есть вероятность i -го технического состояния ИТКС.

Пусть также определено множество параметров мониторинга $\Lambda = \{\lambda_{i,j}\}$, на котором образы заданных технических состояний ИТКС попарно различимы между собой, т.е. выполняется условие

$$\forall v_i, v_f \in V, i \neq f \exists \rho_j : \lambda_j \in \Lambda, \gamma_{i,j} \neq \gamma_{f,j}, \quad (1)$$

где $\gamma_{i,j}, \gamma_{f,j}$ – исходы опроса параметра $\lambda_j \in \Lambda$ в состояниях v_i и v_f соответственно.

Опрос каждого параметра $\lambda_j \in \Lambda$ может давать конечное число исходов m_j . Условие (1) означает, что для любой пары технических состояний ИТКС в заданном множестве $\Lambda = \{\lambda_{i,j}\}$ найдется, по крайней мере, один параметр, запрос которого дает различные исходы в этих состояниях.

Для распознавания i -го технического состояния ИТКС требуется «свое» подмножество параметров $\Lambda_i \subseteq \Lambda$, подлежащих опросу. Для нахождения этих подмножеств иногда следует учитывать вероятности ошибок первого и второго рода, которые возникают при опросе параметров мониторинга и интерпретации полученных результатов.

Требуется при указанных условиях найти для каждого i -го технического состояния ИТКС упорядоченное подмножество параметров $\Lambda_i \subseteq \Lambda$, такое, что

$$\Lambda_i = \{\lambda_j \mid \lambda_j \in \Lambda, \forall v_i \in V, \forall v_f \in V \setminus \{v_i\}, \gamma_{i,j} \neq \gamma_{f,j}\}. \quad (2)$$

Кроме того, необходимо чтобы это подмножество содержало наиболее эффективные в определенном смысле проверки параметров мониторинга, т.е. удовлетворяло определенным требованиям оптимальности [14]. Эти требования заключаются, например, в том, чтобы мониторинг найденного подмножества параметров $\Lambda_i \subseteq \Lambda$ обеспечивал определение соответствующего технического состояния ИТКС с максимальной достоверностью или с минимальными временными затратами.

Упорядоченность каждого подмножества $\Lambda_i \subseteq \Lambda$ понимается в том смысле, что порядок расположения параметров в нем не произвольный, а соответствует очередности их опроса в процессе мониторинга.

Выполнение условия (2) гарантирует, что подмножество выбранных параметров $\Lambda_i \subseteq \Lambda$ обеспечит распознавание (с определенной достоверностью) i -го технического состояния ИТКС.

Для нахождения оптимального подмножества параметров $\Lambda_i \subseteq \Lambda$ необходимо определить показатель эффективности процесса мониторинга.

В качестве такого показателя предлагается информационно-временной показатель

$$F_k(\lambda_j) = \frac{I_k(\lambda_j)}{T(\lambda_j)},$$

где $I_k(\lambda_j)$ – количество информации, получаемое при опросе параметра в состоянии $S_k \in S$;
 $T(\lambda_j)$ – время, затрачиваемое на получение значения параметра λ_j .

Параметры в каждом состоянии выбираются из условия обеспечения максимального значения показателя $F_k(\lambda_j)$, т.е.

$$\Lambda_i = \left\{ \lambda_j \mid \lambda_j \in \Lambda_k, F_k(\lambda_j) = \max_{\lambda_s \in \Lambda_k} F_k(\lambda_s) \right\},$$

где Λ_k – множество разрешенных проверок в состоянии $S_k \in S$, определяемое по формуле

$$\Lambda_k = \left\{ \lambda_j \mid \lambda_j \in \Lambda, \exists v_i, v_f \in S_k, v_i, v_f : \gamma_{i,j} \neq \gamma_{f,j} \right\}. \quad (3)$$

Для вычисления количества информации $I_k(\lambda_j)$ применяется подход, основанный на определении информации, получаемой при опросе параметра λ_j как величины, на которую уменьшается энтропия состояния ИТКС после получения значения параметра λ_j :

$$I_k(\lambda_j) = H(S_k) - H(S_k / \lambda_j), \quad (4)$$

где $H(S_k)$ – априорная энтропия исходного состояния $S_k \in S$;

$H(S_k / \lambda_j)$ – апостериорная энтропия этого состояния после получения значения параметра $\lambda_j \in \Lambda_k$.

Энтропия $H(S_k)$ вычисляется через заданные вероятности технических состояний ИТКС $P(v_i)$ по формуле

$$H(S_k) = - \sum_{v_i \in S_k} \frac{P(v_i)}{\sum_{v_f \in S_k} P(v_f)} \log_2 \frac{P(v_i)}{\sum_{v_f \in S_k} P(v_f)}.$$

Для вычисления энтропии $H(S_k / \lambda_j)$ используется формула

$$H(S_k / \lambda_j) = - \sum_{m=1}^{l_j} P_k(\gamma_j^m) H(S_k / \gamma_j^m),$$

где $P_k(\gamma_j^m)$ – вероятность получения исхода γ_j^m запроса значения параметра ρ_j в состоянии S_k ;

$H(S_k / \gamma_j^m)$ – энтропия состояния S_k после получения исхода γ_j^m при запросе значения параметра ρ_j .

Для определения $P_k(\gamma_j^m)$ используется формула

$$P_k(\gamma_j^m) = - \sum_{v_i \in S_{kj}^\gamma} \frac{P(v_i)}{\sum_{v_f \in S_k} P(v_f)}, \quad (5)$$

где S_{kj}^γ – состояние, которое получается из S_k после получения исхода γ_j^m при запросе значения параметра λ_j , т.е.

$$\lambda_j : S_k \rightarrow S_{kj}^\gamma, \quad \bar{\lambda}_j = \gamma_j^m.$$

Значение энтропии $H(S_k / \gamma_j^m)$ определяется выражением

$$H(S_k / \gamma_j^m) = - \sum_{v_f \in S_k} \frac{P(v_i)}{\sum_{s_f \in S_k} P(v_f)} \log_2 \frac{P(v_i)}{\sum_{v_f \in S_k} P(v_f)}. \quad (6)$$

Подставив (5), (6) в (4), получим

$$I_k(\lambda_j) = - \sum_{m=1}^{I_j} P_k(\gamma_j^m) \log_2 P_k(\gamma_j^m).$$

Расчет оптимальной программы начинается с того, что для каждого параметра λ_j из числа разрешенных в начальном состоянии S_k вычисляется показатель $F_k(\lambda_j)$.

По условию (3) выбирается оптимальный показатель и находят новые состояния, которые получаются из состояния S_k при различных исходах γ_j^m результатов запроса значения параметра λ_j . Для каждого из вновь найденных состояний выбирается свой оптимальный показатель, и процесс повторяется до тех пор, пока не будут получены конечные состояния S_i . Определять все возможные состояния S_k и находить для них соответствующие оптимальные параметры не требуется, что значительно снижает объем вычислений.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ

В качестве примера рассмотрим мониторинг сетевого коммутатора как одного из множества элементов ИТКС.

Дано: коммутатор с административной базой данных MIB (Management Information Base).

Настраиваем получение MIB значений объекта доступных только для чтения (read-only). Первоначальная спецификация MIB-I определяла только операции чтения значений пере-

менных. Операции изменения или установки значений объекта являются частью спецификаций MIB-II [13].

Определено шесть параметров MIB, доступных для мониторинга:

λ_1 – System – общие данные об устройстве (к примеру, идентификатор поставщика, время последней инициализации системы);

λ_2 – Interfaces – параметры сетевых интерфейсов устройства;

λ_3 – ifSpeed – пропускная способность интерфейса в битах в секунду (100 для Fast Ethernet);

λ_4 – ifPhysAddress – физический адрес порта, для Fast Ethernet им будет MAC-адрес;

λ_5 – ifAdminStatus – желаемый статус порта;

λ_6 – ifInErrors – количество пришедших пакетов, которые не были переданы протоколу верхнего уровня из-за обнаружения в них ошибок.

Для каждого из параметров задано время в условных единицах, затрачиваемое на его получение $T(v_i)$.

Таким же способом определены десять технических состояний данного коммутатора (v_1 – v_{10}) для каждого из которых заданы априорные вероятности $P(v_i)$.

Множество значений каждого параметра разбито на три подмножества γ^x , γ^y и γ^z . Таким образом, результатом опроса каждого параметра является один из трех исходов (x , y и z). Технически это можно трактовать так: x – заниженное значение параметра, y – нормальное значение параметра, z – превышение нормального значения параметра.

Необходимо найти динамическую программу мониторинга, т.е. последовательность опроса параметров с учетом их информативности и временных затрат на получение их значений.

Решение: на основе заданной информации составляем табл. 1, которую называем моделью наблюдаемого объекта (коммутатора).

Таблица 1

Модель объекта мониторинга

Техн. состояние ИТКС, v_i	Параметры MIB						Вероятность технического состояния, $P(v_i)$
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	
	Признаки						
	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	
v_1	x	x	x	x	x	x	0,16
v_2	y	y	x	z	y	x	0,07
v_3	x	y	z	y	y	x	0,12
v_4	x	x	y	z	y	y	0,11
v_5	x	x	z	x	x	z	0,08
v_6	y	y	y	y	x	z	0,09

Окончание табл. 1

Техн. состояние ИТКС, v_i	Параметры МІВ						Вероятность технического состояния, $P(v_i)$
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	
	Признаки						
	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	
v_7	y	x	z	y	y	y	0,06
v_8	x	y	z	x	y	z	0,13
v_9	x	x	y	z	x	y	0,1
v_{10}	y	x	x	y	x	z	0,08
$T(v_i)$	2	3	2,5	5	3,5	4	$\sum P(v_i) = 1$

Оценим параметры МІВ по показателю $F_k(\lambda_j)$ в начальном состоянии $S^{(10)} = V = (v_1, v_2, \dots, v_k)$.

При опросе параметра λ_1 можно получить два исхода (x и y), следовательно,

$$\lambda_1 : S^{(10)} \rightarrow \begin{cases} S_1^x = S^{(6)} = \{v_1, v_3, v_4, v_5, v_8, v_9\} \\ S_1^y = S^{(4)} = \{v_2, v_6, v_7, v_{10}\} \end{cases}$$

Определим вероятность каждого из исходов опроса параметра λ_1 в состоянии $S^{(10)} = V$:

$$P(\gamma_1^x) = \sum_{v_i \in S_1^x} \frac{P(v_i)}{\sum_{v_f \in S_k} P(v_f)} = 0,16 + 0,12 + 0,11 + 0,08 + 0,13 + 0,1 = 0,7;$$

$$P(\gamma_1^y) = \sum_{v_i \in S_1^y} \frac{P(v_i)}{\sum_{v_f \in S_k} P(v_f)} = 0,07 + 0,09 + 0,06 + 0,08 = 0,3.$$

Вычислим информативность параметра λ_1 в состоянии $S^{(10)} = V$:

$$I(v_1) = -P(\gamma_1^x) \log_2 P(\gamma_1^x) - P(\gamma_1^y) \log_2 P(\gamma_1^y) = -0,7 \log_2 0,7 - 0,3 \log_2 0,3 = 0,8813.$$

Определим величину показателя эффективности F параметра λ_1 :

$$F(\lambda_1) = \frac{I_k(\lambda_j)}{T(\lambda_j)} = \frac{0,8813}{2} = 0,4406.$$

Аналогично вычисляются значения показателя F для остальных параметров МІВ:

$$F(\lambda_2) = 3,325; F(\lambda_3) = 0,63; F(\lambda_4) = 0,388; F(\lambda_5) = 0,286; F(\lambda_6) = 0,393.$$

В качестве оптимального выбирается параметр λ_3 , так как ему соответствует наибольшее значение показателя F .

При опросе параметра λ_3 можно получить три исхода (x , y и z), следовательно,

$$\begin{aligned} S_3^x &= S^{(3)} = \{v_1, v_2, v_{10}\} \\ \lambda_3 : S^{(10)} &\rightarrow S_3^y = S^{(3)} = \{v_4, v_6, v_9\} \\ S_3^z &= S^{(4)} = \{v_3, v_5, v_7, v_8\}. \end{aligned}$$

Определим множество параметров Λ_3^x , «разрешенных» для мониторинга в состоянии S_3^x , т.е. различимых в данном состоянии: $\Lambda_3^x = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$.

Оценим эффективность каждого параметра из Λ_3^x :

– для параметра λ_1

$$\begin{aligned} P_3^x(\gamma_1^x) &= \frac{P(v_1)}{P(v_1) + P(v_2) + P(v_{10})} = \frac{0,16}{0,16 + 0,07 + 0,08} = 0,516; \\ P_3^x(\gamma_1^y) &= \frac{P(v_2) + P(v_{10})}{P(v_1) + P(v_2) + P(v_{10})} = \frac{0,07 + 0,08}{0,16 + 0,07 + 0,08} = 0,484; \\ I_3^x(\lambda_1) &= -0,516 \log_2 0,516 - 0,484 \log_2 0,484 = 0,99924; \\ F_3^x(\lambda_1) &= \frac{0,99924}{2} = 0,499; \end{aligned}$$

– для остальных параметров из Λ_3^x

$$F_3^x(\lambda_2) = 0,26; F_3^x(\lambda_3) = 0,3; F_3^x(\lambda_5) = 0,26; F_3^x(\lambda_6) = 0,26.$$

В качестве оптимального в состоянии $S_3^x = \{v_1, v_2, v_{10}\}$ выбираем параметр λ_1 . Параметр λ_1 дает два исхода (x и y), поэтому состояние $S_3^x = \{v_1, v_2, v_{10}\}$ разбивается на два состояния: $S_{31}^{xx} = \{v_1\}$ и $S_{31}^{xy} = \{v_2, v_{10}\}$. Состояние S_{31}^{xx} является конечным, т.е. $S_{31}^{xx} = S_1$.

Выполняем аналогичные вычисления для каждого из оставшихся неконечных состояний S_k . Процесс вычисления продолжается до получения всех остальных конечных состояний $S_9 - S_{10}$. В результате получаем условную программу мониторинга (рис. 1).

Порядок опроса значений параметров будет зависеть от исхода опроса очередного параметра в соответствии с программой мониторинга (рис. 1).

Произведем сравнение расчетных значений времени мониторинга в случае, когда не используется предложенная методика, и в случае ее применения.

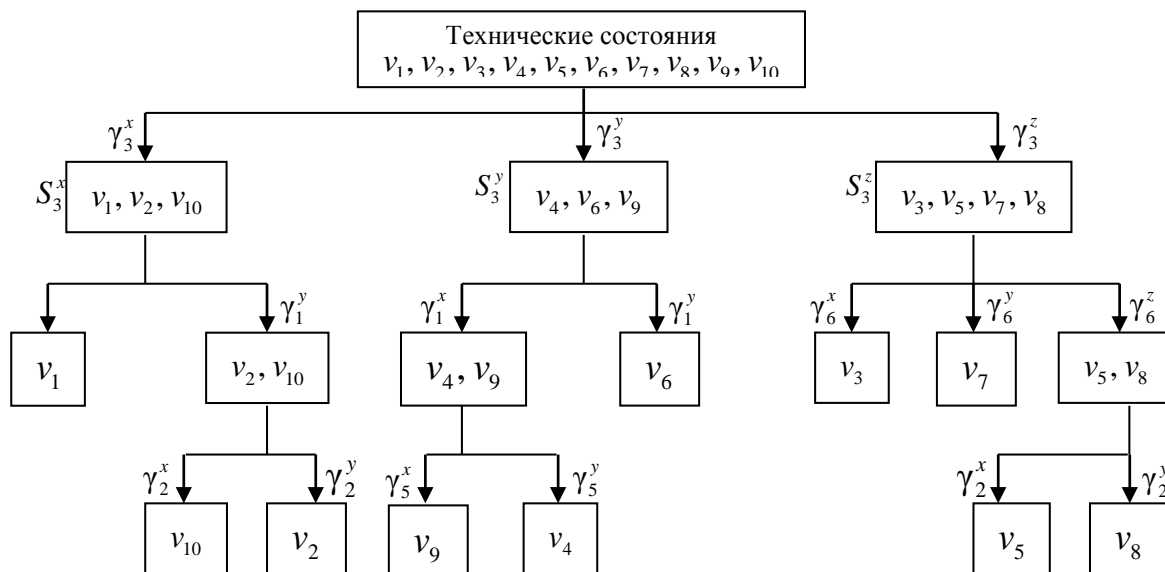


Рис. 1. Условная программа мониторинга ИТКС

Общее время мониторинга всех параметров с λ_1 по λ_6 при их последовательном опросе

$$T_M = \sum_{i=1}^6 \lambda_i = 2 + 3 + 2,5 + 5 + 3,5 = 20.$$

При использовании предложенной методики время мониторинга T_M будет зависеть от того, в каком техническом состоянии находится объект мониторинга. Например, для определения технического состояния v_1 в соответствии с условной программой (рис. 1) необходимо будет опросить последовательно параметры λ_3 и λ_1 . При этом время мониторинга будет определяться по формуле

$$T_{M(v_1)} = T(\lambda_3) + T(\lambda_1) = 2,5 + 2 = 4,5.$$

Для технического состояния v_2

$$T_{M(v_2)} = T(\lambda_3) + T(\lambda_1) + T(\lambda_2) = 2,5 + 2 + 3 = 7,5.$$

Поскольку нахождение объекта мониторинга в том или ином техническом состоянии носит вероятностный характер, а вероятности этих состояний известны (таб.1), то возможно рассчитать математическое ожидание времени мониторинга объекта:

$$\bar{T}_M = \sum_{i=1}^{10} P(v_i) \sum_{j=1}^{10} T(\lambda_j) = 0,16 \cdot 4,5 + 0,07 \cdot 7,5 + 0,12 \cdot 6,5 + \dots = 7,095.$$

То есть оперативность мониторинга при использовании предложенной методики будет значительно повышена.

Таким образом, мониторинг текущего технического состояния коммутатора будет произведен максимально быстро и с наибольшей эффективностью с точки зрения информативности собираемых параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена система мониторинга как подсистема автоматизированной системы диагностирования технического состояния ИТКС.

Предложена методика динамического выбора последовательности опроса параметров с учетом их информативности и временных затрат на получение их значений. Полученная динамическая программа диагностирования позволяет оптимизировать процесс сбора данных о техническом состоянии ИТКС и повысить эффективность процесса мониторинга ИТКС.

Список используемых источников

1. Способ организации контроля качества обслуживания в инфотелекоммуникационной сети на примере ВКА имени А.Ф. Можайского / В.С. Забузов, Д.И. Казанцев, Т.И. Белая, А.С. Швецов // Научный обозреватель. – 2014. – № 12. – С. 56–57.
2. Гончаренко В.А., Забузов В.С. Минимизация времени восстановления информационно-вычислительной сети на основе оптимизации времени сетевого мониторинга // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 649. – С. 72–78.
3. Дмитриев Д.Н., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика. – МО СССР, 1987.
4. Высочина О.С., Шматков С.И., Мухсин С.А. Анализ систем мониторинга телекоммуникационных сетей // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 2 (23). – С. 139–141.
5. Гайфулин Т.А., Костомаров Д.С. Анализ современных систем мониторинга // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 9(2). – С. 51–55.
6. Воронин В.В., Давыдов О.А. Система мониторинга технического состояния локальной вычислительной сети // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – № 4. – С. 805–810.
7. Буренин И.Н., Легков К.Е., Нестеренко О.Е. К вопросу моделирования процессов мониторинга при обеспечении оперативного контроля эксплуатации инфокоммуникационных сетей специального назначения // Труды Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. – 2014. – № 3 (28). – С. 9–15.
8. Еремеев В.Б. Разработка математического и программного обеспечения активного мониторинга вычислительной сети // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2008. – № 4. – С. 50–54.
9. Системы устранения сетевых аномалий и методики построения их архитектуры / В.А. Кучер, А.С. Магомадов, Н.Д. Чигликова, Р.А. Дьяченко // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 110(06). – С. 1836–1846.
10. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 162–174.
11. Сторожук Д.О. Методы и алгоритмы для систем мониторинга локальных сетей: дисс. ...канд. техн. наук: 05.13.13: защищена 2008, Московский физико-технический ин-т. – М., 2008. – 121 с.
12. Легков К.Е. Системный подход к мониторингу информационной системы специального назначения // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. – М.: ООО "Издательский дом Медиа публицер", 2016. – № 1. – С. 66–70.
13. Management Information Base. – «seopedia». – URL: http://w.sbp.com/wiki/Management_Information_Base (дата обращения: 15.04.2016).

В.В. Звонарев;
А.С. Попов,
доктор техн. наук, профессор;
В.А. Пряхин;
А.М. Шаймарданов,
кандидат техн. наук

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ В КАНАЛЕ С ЗАМИРАНИЯМИ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОЙ РЕДУЦИРОВАННОЙ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МЕРЫ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Рассматриваются подходы к разрешению противоречий в теории передачи дискретных сообщений (ПДС) в канале с замираниями сигналов. Противоречия вызваны несоответствиями принятой одномерной вероятностной модели, не учитывающей динамику случайного процесса замираний. Предлагается и обосновывается показатель качества канала в условиях замираний, использующий многомерную редуцированную вероятностную модель.

Ключевые слова: замирания сигналов, многомерная редуцированная вероятностная мера, дискретные сообщения, длительности интервала корреляции, автокорреляционная функция.

В общем случае радиоканалы связи с подвижными объектами имеют замирания сигнала, в частности, вследствие многолучевости распространения электромагнитной волны [1, 2]. По мере увеличения дальности появляются замирания сигнала и нарастает их глубина. Канал становится сначала райсовским, а на пределе прямой видимости – релеевским [3]. Отмечается, что помехоустойчивость системы передачи для отдельных канальных реализаций может существенно отличаться от средней вероятности ошибки, т. е. усредненной по всем реализациям. Это приводит к достаточно грубому описанию физического канала [4]. При этом реальные показатели канала существенно отличаются от расчетных.

При передаче дискретных сообщений в канале с постоянными параметрами и белым шумом основным показателем качества связи является средняя вероятность ошибки приема информационного символа $P_{\text{ош}}$. Вторым показателем является вероятность правильного приема $P_{\text{пр}}$ (передачи) сообщения (кодовой группы) из n символов. В канале с постоянными параметрами $P_{\text{пр}}$ в отсутствие избыточности вычисляется по формуле [1]

$$P_{\text{пр}} = (1 - P_{\text{ош}})^n. \quad (1)$$

Иная ситуация, когда в канале присутствуют случайные замирания сигнала на входе приемника (демодулятора). В данном случае как основные показатели качества связи принимаются усредненная по замираниям средняя вероятность ошибки приема информационного символа $\bar{P}_{\text{ош}}$, вероятность правильного приема сообщения $\bar{P}_{\text{пр}}$ и надежность связи H . При этом показатель $\bar{P}_{\text{пр}}$ может трактоваться неоднозначно.

На канальном уровне для ослабления влияния замираний на группирование ошибок используются протоколы передачи символов с перемежением для обеспечения их декорреляции в сообщении (кодовой группе). А также используется передача сообщений с повторением (переспросом). При этом расчеты показывают, что скорость передачи существенно, в разы, снижается. Кроме того, в правильности приема сообщения большого выигрыша не достигается, поскольку при расчете используется усредненная по всем реализациям

вероятность ошибки $\bar{P}_{\text{ош}}$, которая обычно на 2-3 и более порядка больше вероятности ошибки приема символа в канале без замираний – $P_{\text{ош}}$.

В работе [5] приводится пример расчета вероятности правильного приема сообщения в 200 символов и показано, что скорость передачи в канале уменьшается в 7,5 раз. Однако в монографии [1] приведены примеры расчетов по стандартной методике. Данные расчеты показывают, что кодовые группы (сообщения) без перемежения при усреднении по одномерной вероятностной модели процесса замираний имеют более высокую правильность приема сообщения, чем при использовании перемежения и показателя $\bar{P}_{\text{ош}}$.

Таким образом, в данных примерах показано [1], что для достижения одинаковой вероятности ошибочного приема 100-разрядной кодовой комбинации, например, при релейских замираниях с использованием показателя $\bar{P}_{\text{ош}}$, среднюю мощность передаваемого сигнала нужно увеличить в 550 раз по отношению к условиям канала без замираний, а без применения перемежения – достаточно увеличить только в 50 раз. В работе [1] сделан вывод: «...если сравнивать каналы по вероятности правильного приема сравнительно длинных кодовых комбинаций, то наличие медленных замираний не в такой степени ухудшает качество канала, как при сравнении по вероятности правильного приема отдельного символа».

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что имеет место неоднозначность результатов расчетов при расхождении более чем на порядок. Следует отметить, что длина кодовой группы определяется числом символов, и никак не отмечаются ее длительность и влияние на качество приема сообщений, например, длительности интервала корреляции.

Вместе с тем замирания сигнала в физическом канале приводят к ошибкам приема символов на канальном уровне (в дискретном канале), которые могут группироваться внутри кодовой группы (сообщения). Для статистического описания этих групп применяются известные методики на основе моделей Гильберта, Элиота – Гильберта, Фричмана и др. [6].

Модели группирования ошибок в формализованном виде никак не связаны с моделями замираний сигнала в физическом канале. Параметры модели группирования ошибок обычно подгоняются подбором при режиме прогона тестовых сообщений за заданное время [6]. Таким образом, не определена связь между моделями замираний в физическом канале и моделями группирования ошибок в сообщении в дискретном цифровом канале после детектирования.

Кроме того, в перечисленных выше работах показывается, что усредненная по одномерной вероятностной мере замираний вероятность ошибки приема символа является монотонной функцией отношения сигнал/шум $\bar{h}^2 = E/N_0$, где E – энергия информационного символа; N_0 – односторонняя спектральная плотность шума в канале. И это представление используется при расчетах параметров канала и качества связи при замираниях. Однако в работе [1] показано, что локальный учет даже очень небольшого изменения уровня сигнала вследствие замираний в течение длительности информационного символа приводит к постоянству значения $\bar{P}_{\text{ош}}$ после достижения \bar{h}^2 некоторой величины, т. е. функция $\bar{P}_{\text{ош}}(\bar{h}^2)$ перестает быть монотонной и достигает «насыщения».

Конкретное значение $\bar{P}_{\text{ош}}$ при «насыщении» определяется видом функции коэффициента корреляции процесса замираний и длительностью информационного символа.

В приведенных условиях графики подтверждают, что увеличение среднего уровня \bar{h}^2 или мощности сигнала не приводит к уменьшению вероятности ошибки приема информационного символа $\bar{P}_{\text{ош}}$.

Вследствие названных теоретических противоречий возможна следующая интерпретация указанного явления «насыщения» применительно к учету скорости изменения уровня сигнала.

ла. Вид кривой \bar{h}^2 , соответствующей скорости изменения уровня сигнала, также изменяется, что приводит к изменению значения $\bar{P}_{\text{ош}}(\bar{h}^2)$ на порядки, как бы перескакивающей на конкретные кривые из семейства этих кривых $\bar{P}_{\text{ош}}(\bar{h}^2)$ даже при постоянстве \bar{h}^2 .

В вышеперечисленных работах принята характеристика канала связи на физическом уровне – надежность связи, показывающая процент времени, когда уровень сигнала на входе демодулятора выше порогового значения и качество связи не хуже требуемого. Надежность связи определяется по одномерной плотности вероятности процесса замираний сигнала. На канальном уровне передачи сообщений эта характеристика малоинформативна и не отражает реальных длительностей перерывов в приеме сообщений, вызываемых, например, срывами синхронизации, и затрат времени на ее восстановление [8].

С другой стороны, например, в работе [7], показано, что при расчете радиолиний радиорелейной связи возможны различные виды формализации расчета на основе показателя надежности связи, приводящие к существенно отличающимся результатам.

Таким образом, при наличии замираний сигнала в физическом канале классическая теория ПДС имеет ограниченное применение, и перечисленные теоретические противоречия вызваны несоответствиями принятой одномерной вероятностной модели.

В первую очередь несоответствие принятой одномерной вероятностной модели заключается в ее одномерности. Такая модель не учитывает динамики случайного процесса замираний, таких его характеристик, как автокорреляционная функция и длительность интервала корреляции, а также других центральных и начальных моментов случайного процесса. При усреднении по одномерной вероятностной мере используется условие так называемой «локальной стационарности», когда уровень сигнала (или коэффициент передачи канала) сохраняется неизменным в течение некоторого интервала времени. На другом интервале опять канал считается постоянным, но, может быть, с другими характеристиками. Влияние поведения канала в промежуточных состояниях не принимается во внимание, считается, что уровень сигнала изменяется ступенчато.

Усреднение по одномерной вероятности может интерпретироваться так. Имеется множество каналов (сеансов связи) с постоянными, но случайными значениями коэффициента передачи. В каждом сеансе связи случайным образом выбирается такой постоянный канал со случайным, но фиксированным значением коэффициента передачи (уровнем сигнала). На множестве таких каналов находятся средние значения коэффициента передачи, отношения сигнал/шум \bar{h}^2 , вероятности ошибки приема символа $\bar{P}_{\text{ош}}$ и т. д. При этом отношение к реальным условиям работы самое отдаленное, динамические характеристики процесса замираний не принимаются во внимание.

Для исключения подходов к разрешению теоретических противоречий предлагается ввести два показателя качества связи в канале с замираниями: вероятность правильного приема сообщения конечной длительности $P_{\text{пр}}^*$ и вероятность безобрывной связи конечной длительности $P_{\text{бo}}$. Первый показатель является общим показателем качества (связи) передачи информации, а второй – показателем качества канала на сеансе связи конечной длительности.

Вероятность безобрывной связи $P_{\text{бo}}$ на конечном интервале времени T показывает вероятность того, что в течение этого времени уровень сигнала не становится ниже заданного порогового значения. Этим интервалом, в том числе, может быть и длительность принимаемого сообщения (кодовой группы).

Введение такого показателя требует использования вероятностной модели случайного процесса замираний в виде редуцированной многомерной вероятностной меры $w(\vec{u})$. Для этого предлагается аппроксимировать непрерывную или даже недифференцируемую реали-

зацию случайного процесса ломаной линией с «вершинами» во временных сечениях внутри наблюдаемого отрезка времени T (рис. 1) [9].

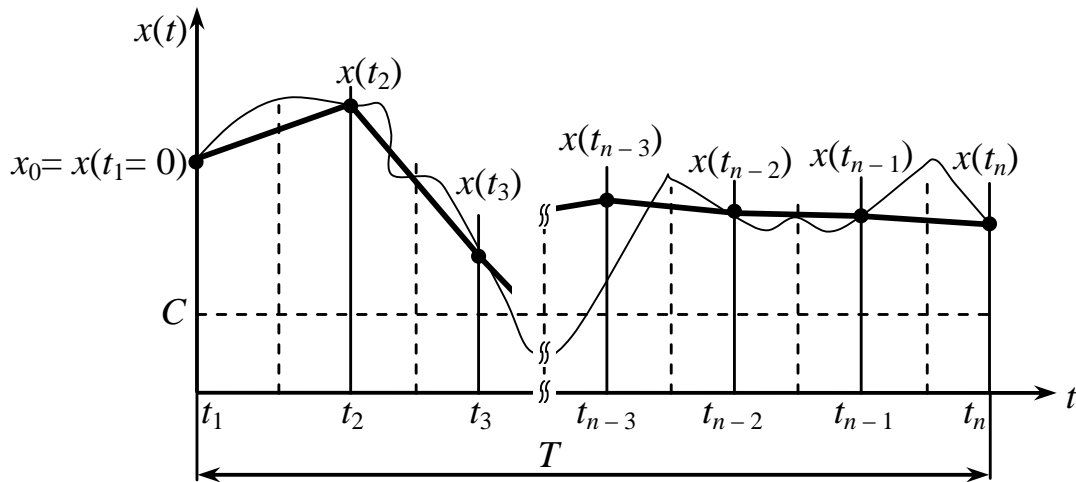


Рис. 1. Аппроксимация непрерывной реализации случайного процесса ломаной линией с «вершинами» во временных сечениях внутри наблюдаемого отрезка времени T

В соответствии с введенными выше обозначениями вероятность правильного приема сообщения длительности T в канале с замираниями сигнала определяется выражением

$$P_{\text{пр}}^* \geq P_{\text{пр}} P_{\text{бo}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пр}}$ – вероятность правильного приема сообщений конечной длительности без замираний сигнала.

Вероятность безобрывной связи $P_{\text{бo}}$ определяется по формуле [9]

$$P_{\text{бo}} = \int \int_{\vec{u}_{\text{пор}}}^{\infty} \dots \int w(\vec{u}) d\vec{u}. \quad (3)$$

В приведенной формуле (3) введены следующие обозначения: \vec{u} – значения векторной случайной величины уровня сигнала в сечениях временного интервала T (число сечений определяет размерность вектора \vec{u}); $\vec{u}_{\text{пор}}$ – вектор пороговых значений уровня сигнала. В практически важных случаях – это вектор одинаковых величин.

В работах [9, 10] даны результаты исследования введенных характеристик на основе предложенного подхода. Здесь рассматриваются одномерные, двумерные, трехмерные, четырехмерные и пятимерные релеевские законы распределения (ЗР) случайной величины (СВ), полученные из общей формулы

$$w_n(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n; \tau) = \frac{\prod_{i=1}^n r_i}{\sigma^{2n} (1 - R_0^2)^{n-1}} \exp \left\{ - \frac{r_1^2 + (1 + R_0^2) \sum_{i=2}^{n-1} r_i^2 + r_n^2}{2\sigma^2 (1 - R_0^2)} \right\} \prod_{i=1}^{n-1} I_0 \left[\frac{R_0 r_i r_{i+1}}{\sigma^2 (1 - R_0^2)} \right],$$

где r_n – значение случайной величины;

R_0 – функция корреляции случайного процесса.

В частности, представлены монотонные зависимости показателя $P_{\text{бo}}$ от отношения интервала корреляции τ_0 случайного процесса замираний сигнала к длительности сообщения T (рис. 2).

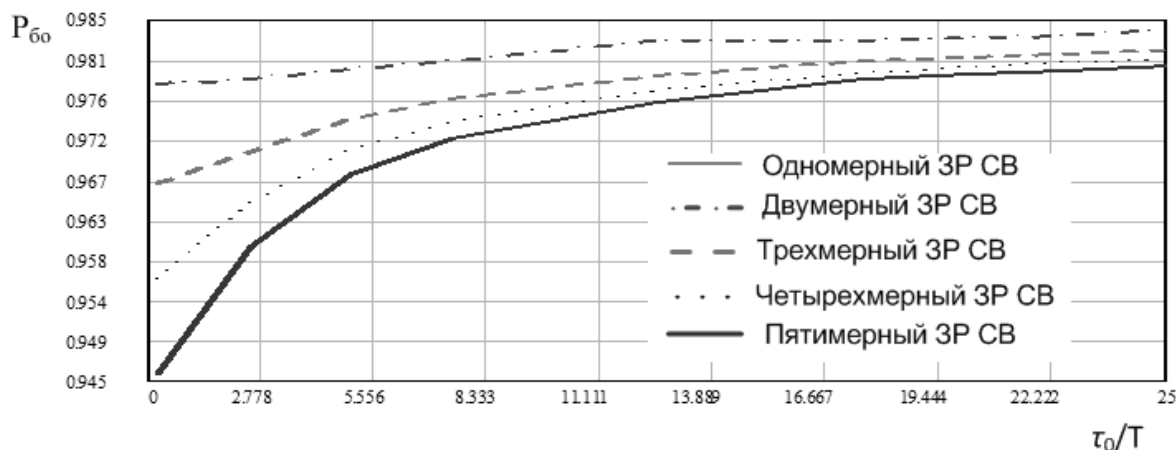


Рис. 2. Зависимость вероятности безобрывной связи от отношения интервала корреляции к интервалу сеанса связи

Анализируя рис. 2, можно сделать следующие выводы:

1. Чем меньше отношение интервала корреляции к интервалу сеанса связи, тем меньше вероятность безобрывной связи, что не показано при одномерном случае (прямая), так как расчеты, проводимые на усреднении всей реализации (по одномерным ПВ), не учитывают динамических характеристик (интервал корреляции, конечный промежуток времени передачи). Данное явление показывает, что когда отношение интервала корреляции к интервалу сеанса связи достаточно мало, то средняя вероятность ошибки не достаточно полно характеризует качество приема.

2. С увеличением отношения интервала корреляции к интервалу времени передачи сообщения графики, построенные по многомерным ПВ, асимптотически стремятся к графику, построенному по одномерной ПВ. Это показывает непротиворечивость предлагаемой методики по отношению к существующему подходу расчета вероятности приема сообщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория передачи дискретных сообщений в канале с замираниями требует разработки и совершенствования.

Для радиоканала передачи дискретных сообщений в условиях замираний важной характеристикой является вероятность правильного приема сообщения как в отсутствие, так и при наличии организованных помех. Традиционный параметр надежности связи не тождественен этой вероятности. При определении ее необходим иной подход, а именно введение дополнительной характеристики радиоканала связи при наличии замираний. Такой характеристикой может быть вероятность безобрывной (ненарушаемой) связи при передаче дискретного сообщения конечной длительности.

Использование предлагаемого показателя качества связи в канале с замираниями позволяет следующее:

- без искусственной потери пропускной способности канала обеспечить с высокой точностью поддержание требуемого качества канала в текущем (реальном) времени;
- прогнозировать вероятность правильного приема сообщения при использовании требуемых мер установления режимов передачи дискретных сообщений.

Представленные в статье показатели качества канала связи с замираниями применяются при обнаружении и различении сигналов на фоне шумов, при расчете помехозащищенности и надежности связи, при оценке характеристик распространения радиоволн.

Список используемых источников

1. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. – Изд. 2-е. – М.: Сов. радио, 1970. – 728 с.
2. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
3. Оптимизация сигнально-кодовых конструкций для связанных радиоканалов с глубокими релейскими замираниями / М.Ф. Шебакпольский, А.Б. Царев, М.М. Крахмалева, Э.В. Волкова, А.Ю. Родионов // Труды III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М., 2009. – С. 464–469.
4. *Давыдов А.В., Мальцев А.А.* Метод предсказания помехоустойчивости систем с ортогональными поднесущими в частотно-селективных каналах и шумом // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика. – 2007. – № 4. – С. 58–61.
5. *Маковий В.А., Чупеев С.А.* Оптимизация протоколов передачи данных по КВ каналу // Теория и техника радиосвязи: научно-техн. сб. / ОАО «Концерн “Созвездие”». – Воронеж, 2010. – Вып. 2. – С. 92–101.
6. *Коричнев Л.П., Королев В.Д.* Статистический контроль каналов связи. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.
7. *Волков Е.А., Куликов В.В.* Методика расчета радиорелейных и тропосферных линий при планировании их развертывания. – Л.: ВАС им. С.М. Буденного, 1987. – 111 с.
8. *Звонарев В.В., Парамонов И.Ю., Попов А.С.* Методика расчета надежности связи с учетом времени восстановления синхронизации оконечных устройств в канале с замираниями // Сборник рефератов депонированных рукописей. Сер. Б. – ЦВНИ МО РФ, 2014. – Вып. № 109. – С. 135–141.
9. *Звонарев В.В., Попов А.С.* Вероятность безобрывной связи как показатель эффективности канала с замираниями // Вопросы радиоэлектроники СОИУ. – 2014. – Вып. № 1. – С. 103–106.
10. *Звонарев В.В., Попов А.С., Филиппов А.А.* Вероятность безобрывной связи как вероятность передачи сообщения в канале с замираниями // Вестник войсковой ПВО. – 2015. – Вып. 12. – С. 55–60.

А.Р. Павлов,
кандидат техн. наук;
Н.С. Топорков

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОРЕСУРСА В СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ ТРАФИКА

В статье рассматривается вариант организации множественного доступа к радиоресурсу спутника ретранслятора с выделением каналов по требованию на основе резервирования. Исследуются модели с фиксированной и динамически изменяемой величиной резерва канальной емкости спутника-ретранслятора.

Ключевые слова: радиоресурс, динамическое резервирование, спутниковая связь.

Для удаленных и труднодоступных регионов России использование систем спутниковой связи (ССС) зачастую является единственно возможным средством доступа к современным информационным услугам. Принципиальная ограниченность частотно-энергетического ресурса (далее – радиоресурса) спутника-ретранслятора (СР) и большая численность потенциальных абонентов в обширной зоне обслуживания выдвигают на первый план проблему динамического перераспределения радиоресурса между активными и пассивными направлениями связи.

Дополнительным фактором, усиливающим актуальность разрешения указанной проблемы, является неоднородность и как следствие – нестационарность (пульсация) трафика, формируемого различными мультимедийными службами [1, 4, 6]. Следует ожидать, что учет различий в требованиях к качеству доставки разных видов трафика, а также прерывистого характера процесса обмена информацией позволит добиться существенного повышения пропускной способности ССС на основе оперативного маневра радиоресурсом СР между радионаправлениями. Главным препятствием на пути внедрения методов оперативного управления перераспределением радиоресурса СР являются значительные задержки распространения сигналов в спутниковых радиолиниях [1, 6].

Предлагаемый в работе подход состоит в том, что запрашиваемый (и выделяемый) для земной станции (ЗС) в радионаправлении радиоресурс включает не только некоторое число i ресурсных единиц (каналов) ретранслятора, необходимое для поддержания требуемого качества связи для активных соединений, но и дополнительный резерв (запас), призванный скомпенсировать запаздывание в управлении СР (при внезапной активизации «молчащих» на текущий момент абонентов).

Задачу определения минимальной величины резерва R рассмотрим на примере уплотнения группы из M абонентов, ведущих телефонные переговоры через периферийную ЗС в одном радионаправлении. Учитывая высокий процент (>60%) пауз в процессе телефонного разговора [2, 3, 5], следует ожидать, что при использовании пакетной формы передачи речи в режиме подавления пауз удастся существенно сократить величину выделяемого ЗС ресурса каналов K (в том числе с дополнительным резервом R) и соответственно повысить емкость радиосети в целом. Дополнительно следует учесть некоторую смысловую избыточность речи, которая допускает до 1–5% потерь от общего числа речевых пакетов без снижения качества диалога [2, 4, 7]. Задача состоит в определении величины запрашиваемого каждой ЗС резерва R , необходимого для поддержания заданного качества связи (уровня потерь) с учетом запаздывания при управлении. Эффективность управления можно оценить значением достигаемого коэффициента уплотнения [5].

Причем возможны две стратегии выбора значения резерва R . Первая стратегия состоит в том, что величина резерва R устанавливается фиксированной для каждой группы абонен-

тов и минимальной при ограничении на вероятность потери речевого пакета. Вторая стратегия выбора величины резерва R состоит в том, что величина резерва адаптивно изменяется в зависимости от числа активных в текущем цикле абонентов и емкости канальной группы. Очевидно, что вторая стратегия более сложна в реализации, так как в этом случае необходимо вести таблицу значений R для каждого соотношения числа i активных абонентов и емкости K выделенного ЗС ресурса пропускной способности СР.

Так как число активных абонентов в группе изменяется случайным образом, независимо от числа выделенных каналов, то каждое состояние можно характеризовать парой чисел (i, j) , где $i = \overline{0, M}$ – число активных абонентов; $j = \overline{R, \min[K, (i + R)]}$ – число выделенных для телефонии каналов.

При первой стратегии (с фиксированным резервом) необходимо поддерживать постоянную величину R до тех пор, пока не будет исчерпан весь доступный ресурс каналов. В качестве примера на рис. 1 изображен граф переходов в марковской цепи, моделирующей процесс уплотнения группы из четырех абонентов при фиксированной величине резерва $R = 1$.

Динамическое выделение каналов ЗС (при активизации абонента) осуществляется не мгновенно, а с запаздыванием, через некоторый случайный интервал времени, значение которого определяется задержкой распространения сигналов до СР и протоколом множественного доступа.

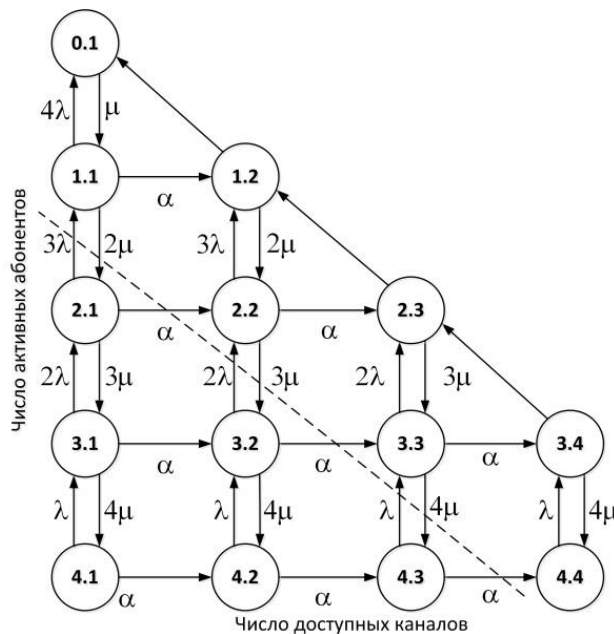


Рис. 1. Модель процесса обслуживания четырехканальной группы с динамическим резервированием одного дополнительного канала

В качестве допущения, позволяющего воспользоваться аппаратом теории марковских процессов, примем, что такая величина задержки распространения имеет показательное распределение со средним значением T_p . Тогда интенсивность переходов из состояний (i, j) в состояния $(i, j+1)$ будет составлять $\alpha = 1/T_p$. На графе (рис. 1) этим переходам соответствуют горизонтальные стрелки в правом направлении. Для расчета стационарных вероятностей состояний такой марковской цепи составлена система линейных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 p_{ij} = \frac{\lambda(N-i+1)p_{(i-1)j} + \mu \min(K, i+1)p_{(i+1)j} + \alpha p_{i(j-1)}}{\lambda(N-i) + \mu i + \alpha}, \quad i=\overline{1, N-1}, \quad j=\overline{R, i+R-1}; \\
 p_{ij} = \frac{\mu \min(K, i+1)(p_{(i+1)j} + p_{(i+1)(j+1)}) + \alpha p_{i(j-1)}}{\lambda(N-i) + \mu i}, \quad i=\overline{1, N-1}, \quad j=i+R; \\
 p_{ij} = 0, \quad (j-i) > R; \\
 p_{Nj} = \frac{\lambda p_{(N-1)j} + \alpha p_{N(j-1)}}{K\mu + \alpha}, \quad j=\overline{R, K-1}; \\
 p_{N,K} = \frac{\lambda p_{(N-1)K} + \alpha p_{N(K-1)}}{\mu K}; \\
 \sum_{i=0}^N \sum_{j=R}^{\min(i+R, K)} p_{ij} = 1.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

Особенность системы уравнений (1) состоит в том, что сумма вероятностей состояний каждого яруса по горизонтали (рис. 1) для каждого индекса i совпадает с вероятностями P_i активизации i абонентов:

$$\sum_{j=R}^{\min(i+R, K)} p_{ij} = P_i. \quad (2)$$

Потери будут происходить в том случае, когда число активных абонентов будет превышать число доступных каналов, т.е. при $(i-j) > 0$. При этом, если $(i-j)=1$, то будут теряться пакеты лишь одного соединения, при $(i-j)=2$ – двух соединений и т.д. Состояния марковской цепи, в которых происходят потери пакетов, отделены в нижней части графа (рис. 1) штриховой линией. Учитывая, что стационарные вероятности состояний показывают, какую долю времени на интервале наблюдения процесс проводит в том или ином состоянии, вероятность потери речевых пакетов может быть оценена соотношением

$$P_n = \sum_{i=R+1}^N \sum_{j=R}^{\min(K, i-1)} (i-j)p_{ij}. \quad (3)$$

Для второй стратегии резервирования с адаптивно изменяемой величиной резерва может быть построена марковская цепь, подобная изображенной на рис. 1. В качестве примера на рис. 2 приведен граф состояний для системы уплотнения шести телефонных каналов при начальном уровне резерва $R_1=2$. После достижения порогового состояния, в котором активны три абонента, уровень резерва снижается на 1, т.е. до $R_2=R_1-1$.

Для данной модели может быть составлена аналогичная (1) система линейных алгебраических уравнений, позволяющая рассчитать стационарные вероятности состояний. Отличием новой системы уравнений от системы (1) является условие

$$p_{ij} = 0 \quad \text{при } i > i_{\text{пр}}; j = i + R_1, \quad (4)$$

где $i_{\text{пр}}$ – предельное значение числа активных абонентов, после которого уровень резерва снижается на 1. Состояния марковской цепи, в которых происходят потери пакетов, отделены в нижней части графа пунктирной линией.

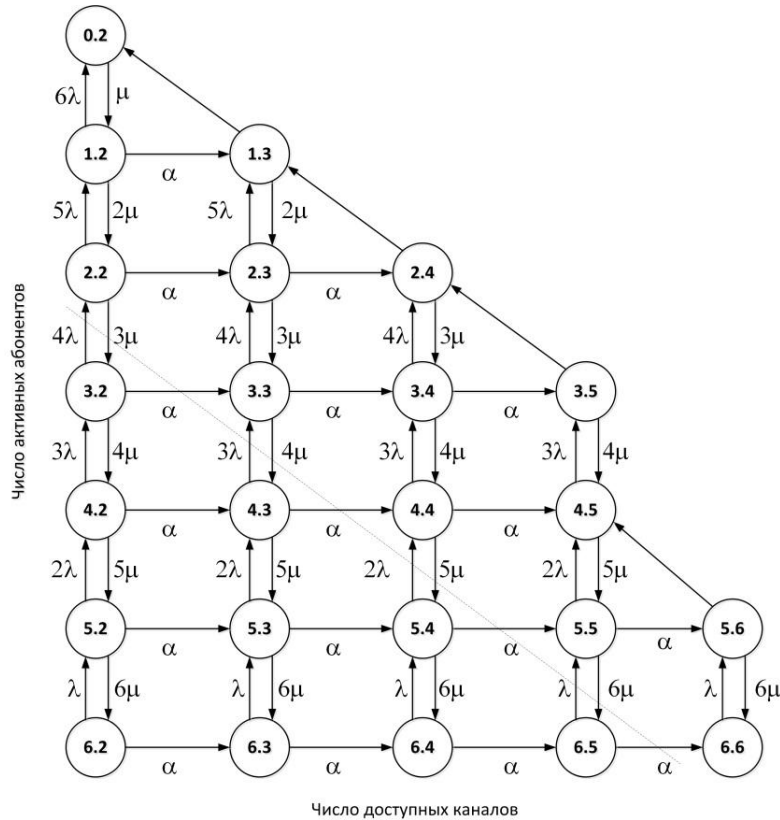


Рис. 2. Модель процесса обслуживания четырехканальной группы с адаптивно изменяемой величиной резерва

При известных вероятностях состояний для первой и второй модели можно оценить среднее число занимаемых трафиком телефонии каналов \bar{K} :

$$\bar{K} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=R}^{\min(K, i+R)} j P_{ij} , \tag{5}$$

а также уровень потерь речевых пакетов и величину свободного ресурса ($K - \bar{K}$), который может быть задействован для передачи данных.

Число каналов, доступных для передачи сообщений данных (не занятых в текущий момент молчащими абонентами), будет случайным образом изменяться от 0 до $(K - R)$. Итак, дополнительный канал передачи данных, образуемый через ЗС, может быть представлен системой массового обслуживания (СМО) с переменной интенсивностью обслуживания.

Если принять допущение о том, что поток поступающих сообщений данных является пуассоновским с параметром γ , а объем сообщений данных является случайной величиной \hat{v} с экспоненциальным распределением

$$B(v) = 1 - e^{-v/\bar{v}} , \tag{6}$$

где \bar{v} – средний объем сообщения данных в битах, то в качестве модели исследуемой СМО может быть использована двумерная марковская цепь, граф состояний которой для рассматриваемого примера представлен на рис.3.

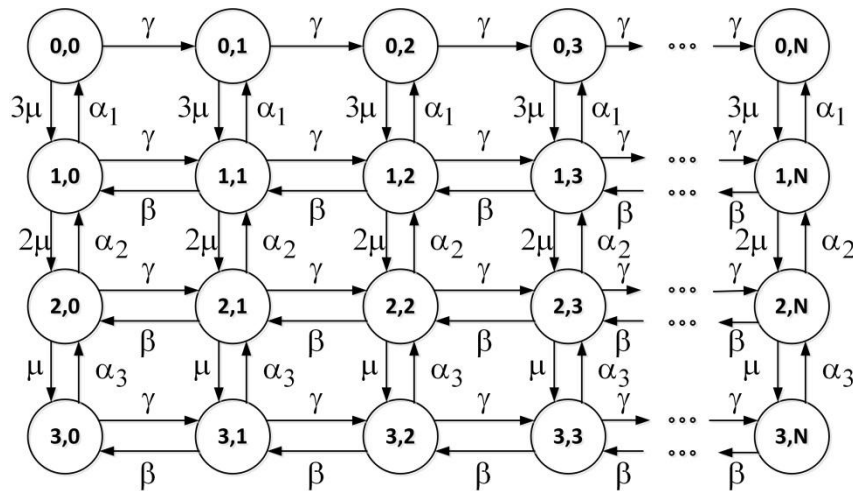


Рис. 3. Модель процесса передачи данных с изменяемой скоростью передачи

Состояния марковской цепи характеризуются парой чисел (i, j) , где i – число свободных каналов, которые могут быть использованы для передачи данных ($i = \overline{0, K - R}$); j – число сообщений данных, которые необходимо передать ($j = \overline{0, N}$); N – предельная емкость буфера данных. Интенсивности переходов между состояниями определяются следующим образом:

γ – интенсивность поступления сообщений данных;

β – интенсивность обслуживания сообщений данных в одном канале мультиплексора, определяемая соотношением $\beta = c / \bar{v}$, где c – скорость передачи в отдельном канале;

μ – интенсивность освобождения каналов;

α_i – интенсивность резервирования i -го канала.

Для расчета стационарных вероятностей состояний p_{ij} рассматриваемой модели может быть составлена система линейных алгебраических уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{0j} = \frac{p_{1j}\alpha_1 + p_{0j-1}\gamma}{(K-R)\mu + \gamma}, \quad j = \overline{1, N-1}; \\ p_{0N} = \frac{p_{1N}\alpha_1 + p_{0N-1}\gamma}{(K-R)\mu}; \\ p_{ij} = \frac{p_{i+1}\alpha_{i+1} + p_{i,j+1}\beta + p_{i,j-1}\gamma + p_{i-1,j}(K-R-i+1)\mu}{\alpha_i + \beta + (K-R-i)\mu + \gamma}, \quad i = \overline{1, K-R}, j = \overline{0, N}; \\ \sum_{i=0}^{K-R} \sum_{j=0}^N p_{ij} = 1. \end{array} \right. \quad (7)$$

После расчета стационарных вероятностей состояний исследуемой марковской цепи легко могут быть вычислены следующие характеристики:

– средняя длина очереди сообщений данных в буфере

$$\bar{q} = \sum_{j=2}^N j \sum_{i=0}^{K-R} p_{ij}; \quad (8)$$

– вероятность переполнения буфера

$$P_{\Pi} = \sum_{i=0}^{K-R} p_{iN}; \quad (9)$$

– среднее время ожидания сообщения данных до начала передачи

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{q}}{\gamma(1-P_{\Pi})}, \quad (10)$$

где γ – интенсивность поступления сообщений данных.

На рис. 4 представлены зависимости предельно достижимой средней скорости передачи данных в зависимости от емкости уплотняемой группы телефонных каналов для трех стратегий резервирования каналов:

а) при первой стратегии резервируется только один дополнительный канал, при этом потери превышают норму уже в группе из 9 каналов;

б) при второй стратегии число резервируемых каналов адаптивно изменяется от 2 до 1 в зависимости от числа активных абонентов. В этом случае коэффициент уплотнения несколько снижается, однако потери остаются в норме при емкости уплотняемой группы вплоть до 14 каналов;

в) третья стратегия резервирования предполагает адаптивное изменение числа резервируемых каналов от 3 до 1 по мере увеличения числа активных абонентов. В этом случае емкость уплотняемой группы может превышать 20 каналов при сохранении потерь на уровне 5%.

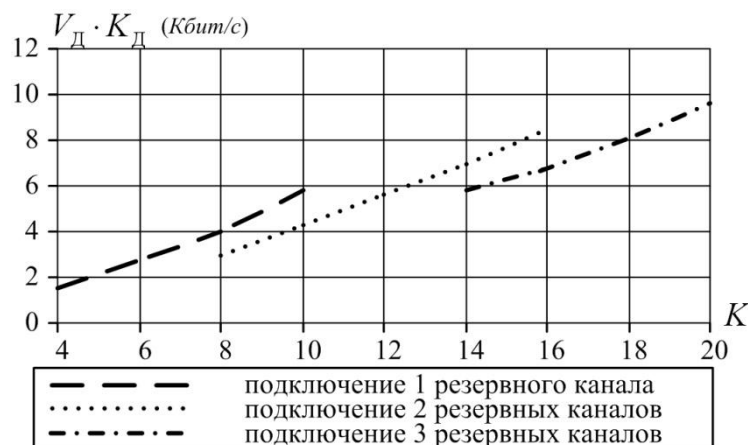


Рис. 4. Средняя скорость передачи канала данных при уплотнении K телефонных каналов и ограничении потерь на уровне 5%

Анализ приведенных зависимостей показывает, что скорость передачи в канале данных растет практически линейно по мере увеличения емкости уплотняемой канальной группы до тех пор, пока не достигается предельный уровень потерь пакетов телефонии и не возникает необходимость увеличения числа резервируемых каналов. Учитывая случайный характер потока сообщений данных и ограничения на максимальную задержку, следует отметить, что реальная скорость передачи в канале данных оказывается меньшей, чем та, которую может обеспечить ресурс незанятых телефонией каналов, и составляет порядка 60% от емкости доступной группы каналов. Ограничивая коэффициент загрузки канала данных на уровне 0.6, можно оценить достигаемый при совместном уплотнении речи и данных коэффициент уплотнения радиолинии K_y :

$$K_y = \frac{M + 0.6 \times (K - \bar{K})}{K}, \quad (11)$$

где M – число уплотняемых источников телефонии.

На рис. 5 представлены зависимости коэффициента уплотнения K_y и коэффициента использования радиоресурса (КИР) от емкости канальной группы K , уплотняемой M телефонными абонентами и потоком данных, при ограничении потерь речевых фрагментов на уровне 5% и предельной задержке сообщений данных на уровне 1 с.

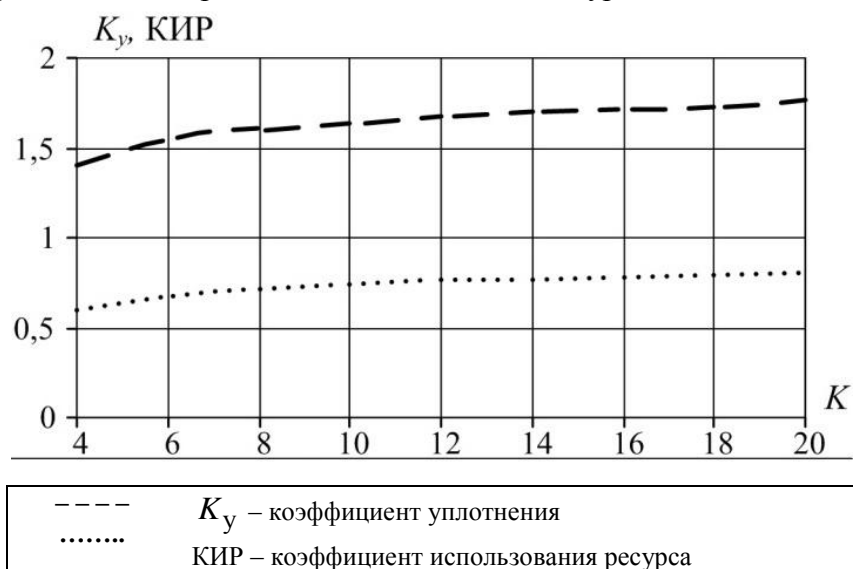


Рис. 5. Зависимость коэффициента уплотнения K_y и КИР радиолинии от емкости канальной группы K , уплотняемой M телефонными абонентами и потоком данных (предельно достижимые значения)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать ряд выводов:

1. Использование механизма динамического распределения каналов каждой ЗС (в зависимости от текущей активности) даже с учетом резерва на запаздывание позволяет заметно (на 20–25%) повысить кратность уплотнения бортового радиоресурса СР по сравнению со статическим закреплением каналов. При этом появляется дополнительная возможность уплотнения спутниковых радиолиний потоками данных, не столь чувствительных к задержкам.

2. Совместное уплотнение образуемой ЗС группы каналов потоками речи и данных позволяет существенно повысить коэффициент использования выделенного станции радиоресурса (до уровня 80%, в отличие от 40% без уплотнения) и практически удвоить емкость ССС.

3. Резервирование фиксированного числа каналов оправдывает себя лишь для небольших групп (до восьми включительно) абонентов (кривая 1, рис. 4). При большей численности группы величина потерь в случае малого уровня резерва (один канал) быстро превышает допустимый уровень, что приводит к невозможности поддержания удовлетворительного качества диалога. В случае же большого уровня резерва (два и более каналов) практически пропадает эффект экономии ресурса пропускной способности уплотняемой спутниковой радиолинии.

4. Для групп абонентов численностью от восьми и выше более выгодным с точки зрения допустимого уровня потерь и достигаемого выигрыша является динамическое резервирование запасных каналов с адаптивно изменяемой величиной резерва. При этом величина необходимого резерва определяется общей численностью уплотняемой группы и текущим значением числа активных абонентов. Значения резерва для различных сочетаний исходных данных могут быть установлены программно или «защиты» в память бортовой вычислительной машины СР на этапе проектирования.

5. Предложенный в работе метод и разработанные математические модели позволяют обоснованно управлять (с учетом запаздывания) выделяемым для каждой ЗС радиоресурсом (числом резервируемых для телефонии и выделяемых для передачи данных каналов), обеспечивая заданные параметры качества обслуживания абонентов.

Список используемых источников

1. *Антонян А.Б.* Пакетная коммутация для передачи речи // Вестник связи. – 1999. – № 5. – С. 68–71.
2. *Коган А.В.* IP-телефония: оценка качества речи // Технологии и средства связи. – 2001. – № 1. – С. 78–84.
3. *Федин Д.Н.* Передача голоса по сетям с пакетной коммутацией // Вестник связи. – 1999. – №9. – С. 33–35.
4. *Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф.* Цифровая обработка речи / под ред. О.И. Шелухина. – М.: Радио и связь, 2000. – 256 с.
5. *Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А., Павлов А.Р.* Решение задачи радиоконтроля орбиты космического аппарата на основе метода вероятностной аппроксимации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – Муром: МИ (филиал) ВлГУ, 2012. – № 1. – С. 43–49.
6. *Новиков Е.А., Павлов А.Р., Зиннуров С.Х.* Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение. Информационно-измерительные и управляющие вычислительные системы. – М., 2014. – № 5. – С. 14–23.
7. *Chandra K.* Statistical multiplexing / Wiley Encyclopedia of Telecommunications. – 2003.
8. *Gruber J.G.* Delay related issues in integrated voice and data networks. // IEEE Trans. Comm. – 1981. – Vol.29, № 6. – P. 768–800.
9. *Minoly D.* Issues in packet voice communication // Proc. IEEE. – 1979. – Vol. 126, № 8. – P. 324–332.

Н.Ф. Аверкиев,
доктор техн. наук, профессор;
С.А. Власов,
кандидат техн. наук, доцент;
В.В. Киселёв;
В.В. Салов,
кандидат техн. наук, доцент

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧИСЛА ПРОЛЕТОВ НАД РАЙОНОМ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Предложен методический подход, позволяющий определить параметры орбит космических аппаратов, на которых спутник движется с повышенным числом пролетов над заданным районом поверхности Земли. Разработаны условия, являющиеся необходимыми, выполнение которых позволяет повысить число пролетов над заданным районом на интервале повторяемости трассы полета спутника, а также представлен итерационный процесс определения чисел p и q , характеризующих квазисинхронные орбиты.

Ключевые слова: характеристика ширины полосы обзора на широте, трасса полета космического аппарата, квазисинхронные орбиты.

Характер и продолжительность обзора заданных районов поверхности Земли определяется параметрами орбит космических аппаратов [1–4]. Исследуем возможности повышения числа пролетов над заданным районом поверхности Земли за счет соответствующего выбора параметров орбит космических аппаратов (КА).

Для анализа возможностей обзора района на поверхности Земли в практике баллистического проектирования орбитальных группировок КА пользуются понятием полосы обзора (ПО) космического аппарата, под которой понимается совокупность геометрических мест мгновенных зон обзора. Мгновенная зона – часть поверхности шарообразной Земли, ограниченная окружностью с центром в подспутниковой точке, которую характеризуют геоцентрическим углом φ_3 . В качестве характеристики ширины ПО на широте ψ используется угол между меридианами, проходящими через крайние точки ПО на рассматриваемой широте, и обозначаемый как $\Delta\lambda_\psi$ [2, 5–6, 9].

При движении КА по круговой орбите с наклоном i для случая, когда $\psi' \in [0, i - \varphi_3)$, характеристика ширины ПО $\Delta\lambda_\psi$ на широте составляет $\Delta\lambda_\psi = \lambda_\pi - \lambda_\lambda$, где λ_π – отсчитанная от меридиана, проходящего через восходящий узел орбиты, долгота крайней точки правой границы ПО на широте ψ' ; λ_λ – отсчитанная от меридиана, проходящего через восходящий узел орбиты, долгота крайней точки левой границы ПО на широте ψ' .

Вспомогательные выражения для расчета величины покрытия зоной обзора параллели на широте ψ' при нахождении КА на широте ψ имеют следующий вид:

$$\sin \lambda = \frac{\cos i \sin u}{\cos \psi'}; \quad \cos \lambda = \frac{\cos u}{\cos \psi'}; \quad \cos \Delta\lambda = \frac{\cos \varphi_3 - \sin \psi \sin \psi'}{\cos \psi \cos \psi'},$$

где λ – долгота подспутниковой точки на широте ψ , отсчитанная от меридиана восходящего узла без учета вращения Земли;
 $\Delta\lambda$ – угол, позволяющий определить захват части параллели с широтой ψ' ;

ψ' – значение широты КА на момент, когда он находится на орбите в точке с аргументом широты u .

Аргумент широты КА u , при котором зона обзора достигает широту ψ' , находится в интервале $u \in [u_n, u_b]$, $\sin u_n = \frac{\sin(\psi - \varphi_3)}{\sin i}$, $\sin u_b = \frac{\sin(\psi + \varphi_3)}{\sin i}$, $\sin \psi' = \sin i \sin u$.

Для определения величин λ_n , λ_n с учетом вращения Земли получим

$$\lambda_n = \min_{u \in [u_n, u_b]} \left(\lambda + \Delta\lambda - u \frac{T_\Omega}{T_{\text{эф}}} \right), \lambda_n = \min_{u \in [u_n, u_b]} \left(\lambda - \Delta\lambda - u \frac{T_\Omega}{T_{\text{эф}}} \right),$$

где T_Ω – драконический период обращения;

$T_{\text{эф}}$ – эффективные сутки, при этом $T_{\text{эф}} = \frac{2\pi}{\omega_3 - \dot{\Omega}}$, $\omega_3 = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$;

$\dot{\Omega}$ – угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты, обусловленная влиянием нецентральности гравитационного поля Земли, $\dot{\Omega} = \frac{3\pi}{T_\Omega} \frac{\pi_2}{\mu p^2} \cos i$,

где $\mu = 398600,44 \text{ км}^3 / \text{c}^2$, $\pi_2 = -1,7555 \cdot 10^{10} \text{ км}^5 / \text{c}^2$;

u – аргумент широты КА, при котором зона обзора касается широты ψ' , $u \in [u_n, u_b]$

Рассмотрим, как изменяется характеристика ширины полосы обзора для орбит с наклоном $i \in \left(\varphi_3, \frac{\pi}{2} - \varphi_3 \right)$. Вид зависимости угла $\Delta\lambda_\psi$ от широты представлен на рис. 1 [2, 7, 8].

На рис. 1 введены следующие обозначения: $\Delta\lambda_{\text{мв}}$ – межвитковое расстояние, $\Delta\lambda_{\text{мв}} = 2\pi \frac{T_\Omega}{T_{\text{эф}}}$;

$\Delta\lambda_3$ – значение характеристики ширины ПО на экваторе.

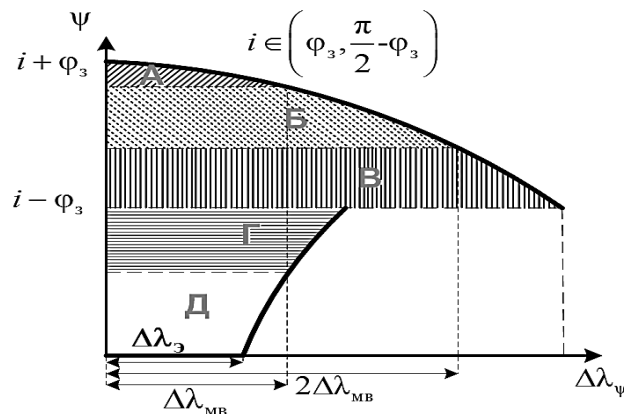


Рис. 1. Зависимость характеристики ширины полосы обзора $\Delta\lambda_\psi$ от широты ψ

При значении широты $\psi = i - \varphi_3$ угол $\Delta\lambda_\psi$ удваивается вследствие того, что обзор данной широты, как и других, лежащих в пределах ПО широт, осуществляется без разрыва во времени на восходящей и нисходящей ветвях траектории.

Рассмотрим первый случай, когда $i - \varphi_3 \leq \psi < i + \varphi_3$. Если $\Delta\lambda_\psi \geq \Delta\lambda_{\text{MB}}$, то обеспечивается гарантированный обзор широтного пояса не менее 1 раза в сутки (области Б, В). Если $\Delta\lambda_\psi \geq 2\Delta\lambda_{\text{MB}}$, то обеспечивается не менее двух пролетов подряд в сутки (область В).

Рассмотрим второй случай, когда $\psi < i - \varphi_3$. Если $\Delta\lambda_\psi \geq \Delta\lambda_{\text{MB}}$, то обеспечивается обзор на восходящих и нисходящих узлах не менее 1 раза в сутки (область Г).

Для обеспечения повышения числа пролетов над районом можно использовать часть характеристики ширины ПО $\Delta\lambda_\psi$, превышающую целое число межвитковых расстояний $\Delta\lambda_{\text{MB}}$ ($2\Delta\lambda_{\text{MB}}$, $3\Delta\lambda_{\text{MB}}$ и т.д.) [9].

Для получения необходимых условий повышения числа пролетов над районом поверхности Земли потребуются дополнительные характеристики трассы полета КА, в частности суточный сдвиг между одноименными узлами на широте $\Delta\lambda_c = \min\{\Delta\lambda_{\text{CB}}, \Delta\lambda_{\text{C3}}\}$, где

$$\Delta\lambda_{\text{CB}} = m\Delta\lambda_{\text{MB}}, \quad \Delta\lambda_{\text{C3}} = (1-m)\Delta\lambda_{\text{MB}}, \quad m = \left\{ \frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \right\};$$

$\Delta\lambda_{\text{п}} = \min\{\Delta\lambda_{\text{пв}}, \Delta\lambda_{\text{пз}}\}$. При этом двойная фигурная скобка в приведенных формулах обозначает дробную часть числа.

Для нахождения восточного и западного сдвигов между разноименными узлами на широте ψ используют формулы:

$$\Delta\lambda_{\text{пв}} = m'\Delta\lambda_{\text{MB}}, \quad \Delta\lambda_{\text{пз}} = (1-m')\Delta\lambda_{\text{MB}}, \quad m' = \left\{ \frac{\pi - \frac{\Delta\lambda_{\text{MB}}}{2} - 2\lambda'}{\Delta\lambda_{\text{MB}}} \right\}, \quad \Delta\lambda' = \arcsin(\operatorname{tg} \psi \operatorname{ctg} i) - \arcsin\left(\frac{\sin \psi}{\sin i}\right) \frac{T_{\Omega}}{T_{\text{эф}}}.$$

Рассмотрим возможности обзора района на широте ψ с долготным размером $\Delta\lambda_p$ на n сутках подряд и k витках в сутки.

Характеристика ширины ПО $\Delta\lambda_\psi$ существенно отличается для широт $\psi \geq i - \varphi_3$ и для широт $\psi < i - \varphi_3$ (см. рис. 1).

Пусть $\psi \geq i - \varphi_3$ (области А, Б, В на рис. 1). В области А $\Delta\lambda_\psi \leq \Delta\lambda_{\text{MB}}$, район может быть просмотрен на одном витке ($k = 1$) в течение n суток подряд, если $\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (n-1)\Delta\lambda_c$.

В области Б $\Delta\lambda_{\text{MB}} \leq \Delta\lambda_\psi < 2\Delta\lambda_{\text{MB}}$, район может быть просмотрен на двух последовательных витках ($k = 2$) в течение n суток подряд, если $\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - \Delta\lambda_{\text{MB}} - (n-1)\Delta\lambda_c$.

В области В $2\Delta\lambda_{\text{MB}} \leq \Delta\lambda_\psi < 3\Delta\lambda_{\text{MB}}$, район может быть просмотрен на трех последовательных витках ($k = 3$) в течение n суток подряд, если $\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - 2\Delta\lambda_{\text{MB}} - (n-1)\Delta\lambda_c$.

Пусть $\psi < i - \varphi_3$ (области Г, Д на рис. 1). В области Г $\Delta\lambda_{\text{MB}} \leq \Delta\lambda_\psi < 2\Delta\lambda_{\text{MB}}$, район может быть просмотрен гарантированно на двух витках – восходящей и нисходящей ветвях, а при определенных условиях дополнительно на восходящей и (или) нисходящей ветвях при выполнении условий:

$$k = 3, \text{ если } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - \Delta\lambda_{\text{MB}} - (n-1)\Delta\lambda_c \text{ или } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - \Delta\lambda_{\text{MB}} - (n-1)\Delta\lambda_{\text{п}};$$

$$k = 4, \text{ если } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - \Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)\Delta\lambda_c \text{ и } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - \Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)\Delta\lambda_\pi.$$

В области Д $\Delta\lambda_\psi \leq \Delta\lambda_{\text{мв}}$, район может быть просмотрен на восходящей и (или) нисходящей ветвях витка при выполнении следующих условий:

$$k = 1, \text{ если } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (n-1)\Delta\lambda_c \text{ или } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (n-1)\Delta\lambda_\pi;$$

$$k = 2, \text{ если } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (n-1)\Delta\lambda_c \text{ и } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (n-1)\Delta\lambda_\pi.$$

Перейдем к общему случаю, для наблюдения подряд в n сутках на k витках, когда $\psi \geq i - \varphi_3$, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)\Delta\lambda_c,$$

где $k = \left[\frac{\Delta\lambda_\psi}{\Delta\lambda_{\text{мв}}} \right]$, а двойная квадратная скобка в приведенных формулах обозначает целую часть числа.

Для $\psi < i - \varphi_3$ при обеспечении просмотра $k = 2k' + 2$ или $k = 2k' + 1$ раз в сутки необходимо, чтобы

$$\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k'-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)\Delta\lambda_c \text{ и (или) } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k'-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)\Delta\lambda_\pi,$$

$$k' = \left[\frac{\Delta\lambda_\psi}{\Delta\lambda_{\text{мв}}} \right].$$

Дополнительные пролеты над районом могут появиться не только подряд каждые сутки, но и через одни сутки, через двое суток и т.д.

Для получения дополнительного обзора через 2 суток, когда $\psi \geq i - \varphi_3$, необходимо выполнение условия $\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)|2\Delta\lambda_c - \Delta\lambda_{\text{мв}}|$, а для случая $\psi < i - \varphi_3$ при обеспечении просмотра $k = 2k' + 2$ или $k = 2k' + 1$ раз в сутки необходимо, чтобы

$$\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k'-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)|2\Delta\lambda_c - \Delta\lambda_{\text{мв}}| \text{ и (или) } \Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k'-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)|2\Delta\lambda_\pi - \Delta\lambda_{\text{мв}}|.$$

В общем случае для получения дополнительного обзора через l суток в n сутках подряд и на k витках, когда $\psi \geq i - \varphi_3$, необходимо выполнение условия

$$\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)|l\Delta\lambda_c - l'\Delta\lambda_{\text{мв}}|,$$

где l' – число межвитковых расстояний, $l' = 0, 1, \dots, l-1$.

Когда $\psi < i - \varphi_3$, при обеспечении просмотра $k = 2k' + 2$ или $k = 2k' + 1$ раз в сутки через l суток и в n сутках подряд необходимо выполнение одного из условий:

$$\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k'-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)|l\Delta\lambda_c - l'\Delta\lambda_{\text{мв}}| \text{ и (или)}$$

$$\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda_\psi - (k'-1)\Delta\lambda_{\text{мв}} - (n-1)|l\Delta\lambda_\pi - l'\Delta\lambda_{\text{мв}}|, \text{ где } l' = 0, 1, \dots, l-1.$$

Из анализа полученных условий следует, что удобные для просмотра района орбиты лежат вблизи квазисинхронных орбит с малым числом суток замыкания трассы. Для этого последовательно просматриваются квазисинхронные орбиты [1, 3, 10]. Перед началом итерационного процесса в качестве первых орбит принимают ближайшие суточные квазисинхронные орбиты. Процесс получения квазисинхронных орбит следующий. На первом шаге

$$p' = \left[\frac{T_{\text{эф}}}{T_\Omega} \right], \quad p'' = p' + 1, \quad q' = q'' = 1, \quad C' = C'' = 1 = q_1. \quad \text{Если } \frac{T_{\text{эф}}}{T_\Omega} < \frac{p' + p''}{2}, \text{ то } p_1 = p'. \text{ Если}$$

$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} > \frac{p' + p''}{2}$, то $p_1 = p''$. По мере возрастания числа суток q определяется следующая квазисинхронная орбита. На втором и последующих шагах, когда $s=2, 3, \dots$, $p_s = p' + p''$, $q_s = q' + q''$, $C_s = C' + C''$, где $\frac{p_s}{q_s}$ – суточная квазисинхронная орбита, начинаемая с $q=2$. Если $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} < \frac{p_s}{q_s}$, то $p_s = p''$, $q_s = q''$, $C'' = C_s$. Если $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} > \frac{p_s}{q_s}$, то $p_s = p'$, $q_s = q'$, $C' = C_s$.

Итерационный процесс заканчивается когда ПО станет больше минимального расстояния между узлами $\Delta\lambda_{\psi} \geq \Delta\lambda_{\min} = \frac{2\pi}{p_s}$. В результате получим набор q_s – суточных квазисинхронных орбит $\frac{p_s}{q_s}$, $s=1, 2, \dots$. На рис. 2 представлен пример построения итерационного процесса.

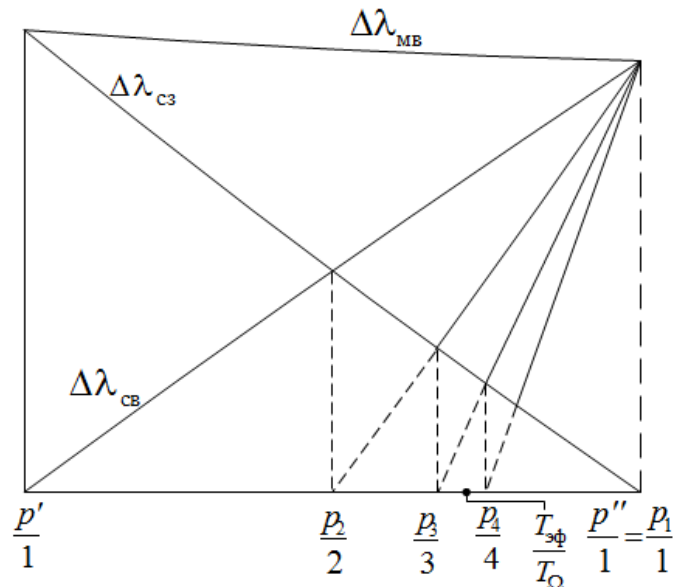


Рис. 2. К определению чисел p и q для квазисинхронных орбит

Таким образом, орбиты с увеличенным числом пролетов над районом поверхности Земли лежат вблизи квазисинхронных орбит с малым циклом замыкания трассы [7, 11]. При движении КА по полученным орбитам число суток n , на которых осуществляется обзор, – не ограничено.

Список используемых источников

1. Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
2. Баллистическое проектирование систем космических аппаратов: учеб. пособие / С.А. Власов, А.В. Кульвиц, И.Ю. Кубасов, Д.А. Мосин. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 86 с.

3. *Разумный Ю.Н.* Синтез орбитальных структур спутниковых систем периодического обзора. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
4. *Мантуров А.М.* Механика управления движением космических аппаратов: учеб. пособие. – Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2003. – 62 с.
5. Особенности и перспективы развития баллистического построения систем КА морского наблюдения / С.А. Власов, А.В. Кульвиц, А.Т. Жаткин, В.В. Киселёв // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 644. – С. 106–110.
6. *Власов С.А., Кубасов И.Ю., Селин В.А.* Расчет баллистической структуры системы космических аппаратов периодического обзора поверхности Земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2010. – Вып. 627. – С. 129–131.
7. *Коваленко А.Ю.* Анализ структурной устойчивости разнородной системы КА // Труды СПИИРАН. – 2014. – № 4 (35). – С. 108–116.
8. *Власов С.А., Кубасов И.Ю., Селин В.А.* Выбор баллистической структуры системы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2010. – Вып. 625. – С. 76–80.
9. Маневрирование космическим аппаратом с целью улучшения характеристик наблюдения района поверхности Земли / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, В.В. Салов, В.В. Киселев // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 157–166.
10. *Аверкиев Н.Ф., Васьков С.А., Салов В.В.* Баллистическое построение системы космических аппаратов связи и пассивной радиолокации лунной поверхности // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 2. – С. 10–15.
11. *Коваленко А.Ю.* Баллистическое проектирование разнородной системы КА с заданным циклом замыкания трассы // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 3 (40). – С. 45–54.

С.Г. Алёхин,
кандидат техн. наук, доцент;
Ю.В. Кулешов,
доктор техн. наук, профессор;
А.А. Туркин;
В.А. Шемелов,
кандидат техн. наук, доцент

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ КОМБИНАЦИИ УСЛОВИЙ

В военно-прикладной метеорологии одной из актуальных задач является задача прогнозирования метеорологических условий на территории, где отсутствует возможность инструментальных метеорологических наблюдений. При этом наиболее трудно прогнозируемое явление в атмосфере – это обледенение летательных аппаратов.

Существующий научно-методический аппарат позволяет прогнозировать обледенение летательных аппаратов в атмосфере либо косвенным путем – с проверкой соответствия вычисленных климатических показателей температуры воздуха, температуры точки росы и высоты нижней границы облачности некоторым условиям наличия/отсутствия обледенения, либо с помощью методов регрессионного анализа путем построения дискриминантной функции, отделяющей случаи умеренного или сильного обледенения и случаи без обледенения в облаках.

Авторы исследовали преимущества и недостатки обоих подходов и предложили новую физико-статистическую модель на основе схемы комбинации условий.

Ключевые слова: обледенение летательных аппаратов, физико-статистическая модель, дискриминантный анализ, комбинация условий.

ВВЕДЕНИЕ

Обледенением летательного аппарата (далее по тексту – ЛА) называется образование на его поверхности льда. При определенных метеорологических условиях ледяной налет растет и превращается в нарост, обладающий способностью по краям увеличиваться быстрее, чем в середине. В результате образования ледяного нароста изменяется профиль несущей поверхности летательного аппарата, что влечет за собой увеличение коэффициента сопротивления и изменение аэродинамических и тактических свойств летательного аппарата [1–3]. При этом в экстремальных случаях – увеличивается его вес, уменьшается тяга двигательной установки, увеличивается удельный расход топлива.

Основными причинами возникновения обледенения являются [4]:

а) сублимация водяного пара, когда при резком снижении охлажденный ЛА попадает в более теплый и влажный воздух;

б) замерзание переохлажденных капель воды, сталкивающихся с поверхностью ЛА.

Интенсивность обледенения пропорциональна скорости полета ЛА, водности облака, она больше на деталях малых поперечных размеров.

Выделяют следующие степени интенсивности обледенения: слабое – 0,01–0,5 мм/мин; умеренное – 0,6–1,0 мм/мин; сильное – 1,1–2,0 мм/мин; очень сильное – более 2,0 мм/мин [1].

Основными факторами, влияющими на интенсивность обледенения, являются повышение водности облаков (1 г/м^3 и более), их агрегатное состояние и размеры водяных капель. Наиболее опасным является обледенение в зонах переохлажденного дождя и в облаках с крупными переохлажденными каплями.

С одной стороны, интенсивность обледенения растет с увеличением скорости полета, что объясняется увеличением объема воздуха, обтекающего ЛА в единицу времени, при этом больше капель сталкивается с ЛА и более мелкие капли оседают.

С другой стороны, при скоростях более 500 км/ч возникает кинетический нагрев поверхности ЛА, который противодействует замерзанию капель. Кинетический нагрев (δT) определяется формулой [1]

$$\delta T = 5 \left(\frac{C}{100} \right)^2, \quad (1)$$

где C – скорость полета, м/с.

В облаках значение кинетического нагрева почти в 2 раза меньше или, другими словами, составляет 60% от кинетического нагрева в сухом воздухе, так как теряется часть тепла на испарение части капель [5, 6]. Для ЛА, движущихся в облаках при диапазоне температур от минус 24 до 0°C, минимальная скорость полета должна превышать:

- при $T = -5^\circ\text{C}$ – 500 км/ч ($\delta T = 5,8^\circ\text{C}$);
- при $T = -8^\circ\text{C}$ – 600 км/ч ($\delta T = 8,3^\circ\text{C}$);
- при $T = -12^\circ\text{C}$ – 700 км/ч ($\delta T = 11,4^\circ\text{C}$);
- при $T = -16^\circ\text{C}$ – 800 км/ч ($\delta T = 14,8^\circ\text{C}$);
- при $T = -18^\circ\text{C}$ – 900 км/ч ($\delta T = 18,8^\circ\text{C}$);
- при $T = -24^\circ\text{C}$ – 1000 км/ч ($\delta T = 23,2^\circ\text{C}$).

При удовлетворении указанного требования кинетическим нагревом компенсируются условия возникновения обледенения. Необходимо заметить, что он неравномерно распределяется по поверхности ЛА, и это может привести к образованию опасной формы обледенения. Кинетический нагрев отдельных частей летательного аппарата (крыла, боковых частей) может быть рассчитан путем умножения значения δT на коэффициент восстановления $K_v = [0,7; 0,8; 0,9]$, который зависит от рассматриваемой части ЛА. Отсюда следует, что на практике обледенению могут быть подвержены все дозвуковые ЛА (скорость полета составляет до 1200 км/ч).

Для характеристики начальных условий возникновения обледенения дозвуковых ЛА рассчитаем минимальную по значению (или максимальную по абсолютной величине) температуру воздуха, при которой возможно обледенение с учетом кинетического нагрева лобовых и боковых частей ЛА (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика начальных условий возникновения обледенения ЛА

Скорость полета ЛА (v), км/ч	Кинетический нагрев (δT), °C	Максимальная (по абс. величине) температура воздуха для возникновения обледенения ($T_{\text{icing}}^{\text{min}}$), °C	Результирующая температура поверхности ЛА при δT ($\Delta T_{\text{ЛА}} = T_{\text{icing}}^{\text{min}} - \delta T$), °C
<i>Лобовые части ЛА</i>			
600	8,3	-9,0	-0,7
700	11,4	-12,0	-0,6
800	14,8	-15,0	-0,2
850	16,8	-17,0	-0,2
900	18,8	-19,0	-0,2
<i>Боковые части ЛА (при $K_v = 0,7$)</i>			
600	5,8	-6,0	-0,2
700	8,0	-8,5	-0,5
800	10,3	-11,0	-0,7
850	11,7	-12,0	-0,3
900	13,1	-14,0	-0,9

Из анализа табл. 1 следует, что несмотря на наличие кинетического нагрева проблема обледенения различной интенсивности для дозвуковых ЛА требует внимания и разрешения.

В районах, где отсутствует возможность инструментальных метеорологических наблюдений, оценить вероятность возникновения обледенения возможно только с помощью физико-статистических методов прогнозирования [7–12]. Указанная проблемная ситуация наглядно подтверждает актуальность разработки новых моделей и методов прогнозирования обледенения беспилотных дозвуковых ЛА, не оснащенных противообледенительными системами, на территории, не освещенной инструментальными метеорологическими наблюдениями.

ХАРАКТЕРИСТИКА ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Обледенение может наблюдаться в широком интервале отрицательных температур от минус 40 до 0°C в основном на высотах до 6 км, но вероятность его возникновения максимальна в сравнительно узких интервалах температуры и относительной влажности воздуха $T \in [-16; 0]$, °C и $f > 63\%$ (модель *NCEP*) [7, 8], а особенно при $T \in [-12; 0]$, °C и $f > 85\%$ на высотах до 3 км зимой и в переходные сезоны, а также летом на высотах 3–6 км [3]. Вне этих интервалов вероятность возникновения обледенения уменьшается.

Так как для возникновения обледенения должны сформироваться определенные метеорологические факторы, представляющие собой комплекс метеорологических параметров и явлений в определенный момент или интервал времени, в состав которого входят температура воздуха и относительная влажность, то представляется необходимым сформулировать условия наличия/отсутствия обледенения для остальных метеорологических параметров (явлений), входящих в комплекс. К таким параметрам относятся:

- доминирующие формы облаков;
- высота нижней границы облачности;
- наличие осадков (морось, переохлажденный дождь, мокрый снег и др.);
- дефицит точки росы.

Общая характеристика облаков нижнего, среднего яруса и вертикального развития, в которых возможно возникновение обледенения различной интенсивности, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Общая характеристика облаков, в которых возможно возникновение обледенения различной интенсивности

Форма облаков	Обозначение облаков	Высота нижней границы, км	Вертикальная протяженность, км	Горизонтальная протяженность, км	Вид осадков
Слоистые	St	0,1–0,7	0,1–1,0	10–1000	Морось
Слоисто-кучевые	Sc	0,4–2,0	0,1–1,0	10–1000	Морось
Слоисто-дождевые	Ns	0,1–1,0	1,0–10	100–1000	Дождь, снег
Высоко-слоистые	As	3–6	0,5–3	100–1000	Дождь, снег
Кучево-дождевые	Cb	0,4–1,5	5–12	5–50	Ливень, град
Высоко-кучевые	Ac	2,0–6,0	0,1–0,8	10–100	–

Дополнительная информация о возможности обледенения содержится в данных о дефиците точки росы $d = T - T_d$. Экспериментальными исследованиями установлено, что при де-

фиците точки росы $0-1^{\circ}\text{C}$ облака находятся в стадии развития, и обледенение наблюдается в 80% случаев [3, 5]. При дефиците точки росы $1-3^{\circ}\text{C}$ облака сохраняют свою форму, и обледенение также наблюдается в 65% случаев. Увеличение дефицита точки росы более 3°C свидетельствует о размывании облаков, и обледенение в 84% случаев отсутствует. При этом для высот менее 3000 м интенсивность обледенения можно оценить с помощью следующих правил:

- $d \in [0; 1]^{\circ}\text{C}$ – обледенение в облаках умеренное и сильное;
- $d \in (1; 2]^{\circ}\text{C}$ – обледенение в облаках слабое и умеренное;
- $d > 2^{\circ}\text{C}$ – обледенение в облаках слабое либо отсутствует.

Кроме того, необходимо учитывать и другие факторы:

- протяженность зон обледенения;
- наличие осадков;
- высоту полета ЛА (с учетом – в облаках или вне);
- скорость полета ЛА в зоне обледенения;
- время полета ЛА в зоне обледенения.

Дополнительно нельзя не упомянуть о краткосрочном методе прогнозирования обледенения, предложенном чешским физиком Годске, который для высот до 2000 м предложил по данным зондирования атмосферы определять величину T_{is} – температуру насыщения надо льдом по формуле [9, 13]

$$T_{is} = -8d = -8(T - Td). \quad (2)$$

Если температура насыщения надо льдом выше температуры окружающего воздуха, то на этом уровне следует ожидать обледенение.

Таким образом, условия наличия/отсутствия обледенения разделим на два вида:

- «V» – условия, определяющие возможность обледенения;
- «I» – условия, определяющие интенсивность обледенения при условии «V».

Условия «V» и «I», в свою очередь, определяются следующими физико-географическими и метеорологическими условиями (МУ):

- рельефом и типом подстилающей поверхности местности;
- временем года;
- типом синоптической ситуации,
- температурой воздуха;
- температурой точки росы (дефицит точки росы);
- температурой насыщения надо льдом;
- относительной влажностью воздуха;
- формой облачности;
- высотой нижней границы облачности;
- наличием осадков.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ КОМБИНАЦИИ УСЛОВИЙ

Пусть при решении задачи прогнозирования обледенения беспилотных дозвуковых ЛА на территории, не освещенной инструментальными метеорологическими наблюдениями, рельеф (RLF), тип подстилающей поверхности (TG), время года (Season), тип синоптической ситуации (MeteoSit), значение температуры воздуха (T) известны априори.

Значение температуры точки росы (Td) вычисляется с помощью выражения

$$Td = c_0 + c_1 T, \quad (3)$$

где c_0, c_1 – коэффициенты линейной парной регрессии при $R_{\bar{T}d Td} \geq 0,95$, причем $R_{\bar{T}d Td}$ – коэффициент корреляции между рассчитанным $\bar{T}d$ и фактическим Td значениями.

Значение температуры насыщения надо льдом вычисляется с помощью выражения (2).

Значение высоты нижней границы облачности (H_{cb}) определяется с помощью следующей формулы [14]:

$$H_{cb} = a_0 + a_1 h_{sl} + a_2 T + a_3 Td + a_4 ff, \quad (4)$$

где h_{sl} – значение превышения местности над уровнем моря, м;

T – температура воздуха, °С;

Td – температура точки росы, °С;

ff – скорость ветра, м/с.

Скорость ветра рассчитывается путем определения эмпирических вероятностей повторений соответствующих значений скорости ветра в исследуемом районе, либо для ее вычисления используется математическое ожидание этого параметра.

Требуется разработать схему комбинации условий наличия/отсутствия обледенения в районе нахождения ЛА.

Поясним, каким образом получить значения относительной влажности (f), информацию о формах облаков (F_{cl}) и возможных видах осадков (PR).

Относительная влажность f определяется по значениям T и d с использованием психрометрических таблиц (рис. 1).

t'	t_d	e	f	d	t'	t_d	e	f	d	t'	t_d	e	f	d	t'	t_d	e	f	d	t'	t_d	e	f	d
-10,0	-10,0	2,86	100	0,00	-9,9	-9,9	2,88	100	0,00	-9,8	-9,8	2,91	100	0,00	-9,7	-9,7	2,93	100	0,00	-9,6	-9,6	2,95	100	0,00
-10,1	-10,5	2,76	97	0,10	-10,0	-10,4	2,78	97	0,10	-9,9	-10,2	2,81	97	0,10	-9,8	-10,1	2,83	97	0,10	-9,7	-10,1	2,85	97	0,10
-10,2	-10,9	2,66	93	0,20	-10,1	-10,8	2,68	93	0,20	-10,0	-10,7	2,71	93	0,20	-9,9	-10,6	2,73	93	0,20	-9,8	-10,5	2,75	93	0,20
-10,3	-11,4	2,56	90	0,30	-10,2	-11,3	2,58	90	0,30	-10,1	-11,2	2,60	89	0,31	-10,0	-11,1	2,63	90	0,30	-9,9	-11,0	2,65	90	0,30
-10,4	-11,9	2,46	86	0,40	-10,3	-11,8	2,48	86	0,40	-10,2	-11,7	2,50	86	0,41	-10,1	-11,6	2,53	86	0,40	-10,0	-11,5	2,55	86	0,40
-10,5	-12,4	2,36	83	0,50	-10,4	-12,3	2,38	83	0,50	-10,3	-12,2	2,40	82	0,51	-10,2	-12,1	2,42	83	0,51	-10,1	-12,0	2,45	83	0,50
-10,6	-13,0	2,26	79	0,60	-10,5	-12,8	2,28	79	0,60	-10,4	-12,7	2,30	79	0,61	-10,3	-12,6	2,32	79	0,61	-10,2	-12,5	2,35	80	0,60
-10,7	-13,5	2,16	76	0,70	-10,6	-13,4	2,18	76	0,70	-10,5	-13,3	2,20	76	0,71	-10,4	-13,2	2,22	76	0,71	-10,3	-13,0	2,25	76	0,70
-10,8	-14,1	2,06	72	0,80	-10,7	-14,0	2,08	72	0,80	-10,6	-13,9	2,10	72	0,81	-10,5	-13,7	2,12	72	0,81	-10,4	-13,6	2,14	73	0,81
-10,9	-14,7	1,96	69	0,90	-10,8	-14,6	1,98	69	0,90	-10,7	-14,4	2,00	69	0,91	-10,6	-14,3	2,02	69	0,91	-10,5	-14,2	2,04	69	0,91
-11,0	-15,3	1,86	65	1,00	-10,9	-15,2	1,88	65	1,00	-10,8	-15,1	1,90	65	1,01	-10,7	-14,9	1,92	66	1,01	-10,6	-14,8	1,94	66	1,01
-11,1	-16,0	1,76	62	1,10	-11,0	-15,9	1,78	62	1,10	-10,9	-15,7	1,80	62	1,11	-10,8	-15,6	1,82	62	1,11	-10,7	-15,5	1,84	62	1,11
-11,2	-16,7	1,66	58	1,20	-11,1	-16,6	1,68	58	1,20	-11,0	-16,4	1,70	58	1,21	-10,9	-16,3	1,72	59	1,21	-10,8	-16,1	1,74	59	1,21
-11,3	-17,4	1,56	55	1,30	-11,2	-17,3	1,58	55	1,30	-11,1	-17,1	1,60	55	1,31	-11,0	-17,0	1,62	55	1,31	-10,9	-16,8	1,64	56	1,31
-11,4	-18,2	1,46	51	1,40	-11,3	-18,1	1,48	51	1,40	-11,2	-17,9	1,50	52	1,41	-11,1	-17,7	1,52	52	1,41	-11,0	-17,5	1,55	53	1,40
-11,5	-19,1	1,36	48	1,50	-11,4	-18,9	1,38	48	1,50	-11,3	-18,7	1,40	48	1,51	-11,2	-18,5	1,43	49	1,50	-11,1	-18,3	1,45	49	1,50
-11,6	-19,9	1,27	44	1,59	-11,5	-19,7	1,29	45	1,59	-11,4	-19,5	1,31	45	1,60	-11,3	-19,3	1,33	45	1,60	-11,2	-19,1	1,35	46	1,60
-11,7	-20,8	1,17	41	1,69	-11,6	-20,6	1,19	41	1,69	-11,5	-20,4	1,21	42	1,70	-11,4	-20,2	1,23	42	1,70	-11,3	-20,0	1,25	42	1,70
-11,8	-21,8	1,07	37	1,79	-11,7	-21,6	1,09	38	1,79	-11,6	-21,4	1,11	38	1,80	-11,5	-21,2	1,13	39	1,80	-11,4	-21,0	1,15	39	1,80
-11,9	-22,9	0,97	34	1,89	-11,8	-22,7	0,99	34	1,89	-11,7	-22,5	1,01	35	1,90	-11,6	-22,3	1,03	35	1,90	-11,5	-22,0	1,05	36	1,90
-12,0	-24,2	0,87	30	1,99	-11,9	-23,9	0,89	31	1,99	-11,8	-23,7	0,91	31	2,00	-11,7	-23,4	0,93	32	2,00	-11,6	-23,2	0,95	32	2,00
-12,1	-25,4	0,78	27	2,08	-12,0	-25,2	0,79	27	2,09	-11,9	-25,0	0,81	28	2,10	-11,8	-24,7	0,83	28	2,10	-11,7	-24,4	0,85	29	2,10
-12,2	-26,9	0,68	24	2,18	-12,1	-26,6	0,70	24	2,18	-12,0	-26,3	0,72	25	2,19	-11,9	-26,0	0,74	25	2,19	-11,8	-25,7	0,76	26	2,19
-12,3	-28,6	0,58	20	2,28	-12,2	-28,2	0,60	21	2,28	-12,1	-27,9	0,62	21	2,29	-12,0	-27,5	0,64	22	2,29	-11,9	-27,2	0,66	22	2,29
-12,4	-30,6	0,48	17	2,38	-12,3	-30,2	0,50	17	2,38	-12,2	-29,8	0,52	18	2,39	-12,1	-29,4	0,54	18	2,39	-12,0	-29,0	0,56	19	2,39
-12,5	-32,8	0,39	14	2,47	-12,4	-32,5	0,40	14	2,48	-12,3	-32,0	0,42	14	2,49	-12,2	-31,5	0,44	15	2,49	-12,1	-31,1	0,46	16	2,49
-12,6	-35,8	0,29	10	2,57	-12,5	-35,1	0,31	11	2,57	-12,4	-34,5	0,33	11	2,58	-12,3	-33,9	0,35	12	2,58	-12,2	-33,6	0,36	12	2,59
-12,7	-40,0	0,19	7	2,67	-12,6	-39,0	0,21	7	2,67	-12,5	-38,1	0,23	8	2,68	-12,4	-37,3	0,25	9	2,68	-12,3	-36,5	0,27	9	2,68
-12,8	-46,0	0,10	3	2,76	-12,7	-45,1	0,11	4	2,77	-12,6	-43,5	0,13	4	2,78	-12,5	-42,2	0,15	5	2,78	-12,4	-41,0	0,17	6	2,78

Рис. 1. Фрагмент психрометрической таблицы

Формы облаков (F_{cl}) и возможные виды осадков (PR) определяются на основе комплексного анализа данных о сезоне года, типе синоптической ситуации и с помощью табл. 2.

Информация о рельефе и типе подстилающей поверхности в районе нахождения ЛА необходима – поскольку вероятность обледенения возрастает при наличии больших водоемов и гор.

Информация о времени года требуется потому, что повторяемость обледенения в теплый, холодный и переходный периоды на разных высотах различная. Так, зимой и в переходные периоды на высотах до 3000 м обледенение наблюдается в 60–70% случаев, а на высотах более 3000 м составляет около 20% случаев. Летом до высот 3000 м обледенение отмечается в 30–40% случаев, а выше 3000 м – более чем в 60% случаев [8, 15].

Для удобства восприятия излагаемого материала исследований, а также для придания стилю изложения технической направленности введем условные обозначения.

Условные обозначения для определения рельефа местности:

RLF_a – равнины;

RLF_b – холмы;

RLF_c – горы.

Условные обозначения для определения типа подстилающей поверхности, которые подразделяются на гидрографические условия местности и тип растительности, преобладающей в данной местности.

Гидрографические условия местности:

TG_hydro_a – болота и озера;

TG_hydro_b – реки и озера;

TG_hydro_c – моря и реки;

TG_hydro_0 – безводно.

Тип растительности:

TG_veg_a – тундровый;

TG_veg_b – лесной;

TG_veg_c – степной;

TG_veg_d – пустынный;

TG_veg_e – луговой и болотный.

Условные обозначения для определения времени года:

ws (warm season) – теплое время года (лето);

cs (cool season) – холодное время года (зима);

wc (warm-cool) – переходный период (зима-весна; лето-осень).

Условные обозначения для определения типов синоптических ситуаций, благоприятных для возникновения обледенения:

тип А – синоптические условия, благоприятные для возникновения самых сильных обледенений;

тип В – синоптические условия, благоприятные для возникновения умеренных и сильных обледенений;

тип С – синоптические условия, благоприятные для возникновения слабых обледенений;

тип D – синоптические условия, при которых обледенение отсутствует либо отсутствует информация о синоптических условиях.

Условные обозначения для определения по значению высоты нижней границы форм облачности и видов возможных осадков, а также условные обозначения форм облачности представлены в табл. 2.

Введем условные обозначения осадков:

PR_a – морось;

PR_b – дождь, снег;

PR_c – ливень, град;

PR_0 – без осадков.

ПОСТРОЕНИЕ СХЕМЫ КОМБИНАЦИИ УСЛОВИЙ НАЛИЧИЯ/ОТСУТСТВИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

На основе проведенного выше анализа сформируем комбинацию условий, определяющих возможность обледенения (табл. 3).

Таблица 3

Комбинация условий, определяющих возможность обледенения

№ п/п	Параметр, характеризующий условия наличия/отсутствия обледенения			Показатель влияния, $v \in [-1; 3]$	
(№1) Рельеф местности					
1	RLF_a			0	
2	RLF_b				
3	RLF_c				
(№2) Гидрография местности					
4	TG_hydro_a			0	
5	TG_hydro_b				
6	TG_hydro_c			+1	
7	TG_hydro_0			0	
(№3) Тип растительности местности					
8	TG_veg_a			+1	
9	TG_veg_b			0	
10	TG_veg_c				
11	TG_veg_d			-1	
12	TG_veg_e			0	
(№4) Тип синоптической ситуации					
13	A			+3	
14	B			+2	
15	C			+1	
16	D			0	
(№5) Температура воздуха, °С					
17	[-40;+5]			+1	
18	[-16;-10]			+2	
19	[-10;0]			+3	
20	> 0			-1	
(№6) Дефицит точки росы, °С					
21	[0;1]			+1	
22	[1;2]				
23	[2;3]			0	
24	> 3			-1	
(№7) Температура насыщения над льдом, °С					
25	$T_{is} \geq T$			+1	
26	$T_{is} < T$			0	
(№8) Относительная влажность, %					
27	<63			-1	
28	[63;85]			+1	
29	>85			+2	
(№9–15) Высота нижней границы облачности (м), форма облаков, вид осадков					
	Высота, м	Форма облаков	Вид осадков	Время года	
30	0	ясно	PR_0	— -1	
31	100–700	St	PR_a	ws	-1
				cs	+1
				wc	
32	100–1000	Ns	PR_b	ws	-1
				cs	+1
				wc	
33	400–1500	Cb	PR_c	ws	+1
				cs	
				wc	
34	400–2000	Sc	PR_a	ws	-1
				cs	+1
				wc	
35	2000–6000	Ac	PR_0	ws	+1
				cs	-1
				wc	0
36	3000–6000	As	PR_b	ws	+1
				cs	
				wc	

При использовании табл. 3 факт наличия/отсутствия обледенения определяется на основе классической формулы теории вероятностей

$$\tilde{P}(\Psi) = \frac{m}{n}. \quad (5)$$

В формуле (5) введены следующие обозначения: $\tilde{P}(\Psi)$ – оценка вероятности наличия обледенения; $m = \sum_{i=1}^{15} V_i$ – сумма показателей влияния (v), характеризующих наличие/отсутствие обледенения; n – общее число параметров, характеризующих условия обледенения. Поясним: общее число параметров, характеризующих условия обледенения, в табл. 3 равно 15 потому, что при анализе значения им присваиваются несовместно. Для каждого параметра можно выбрать только одно значение показателя влияния.

Сформируем комбинацию условий, определяющих интенсивность обледенения (I) (табл. 4).

Таблица 4

Комбинация условий, определяющих интенсивность обледенения

№ п/п	Температура воздуха (поверхности ЛА), °С	Дефицит точки росы, °С	Интенсивность обледенения, мм/мин	Вероятность нал./отсут. облед., %
1	$T \in [-10; 0]$	$d \in [0; 1]$	0,6–1,0 (умеренное); 1,1–2,0 (сильное)	80
		$d \in [1; 2]$	0,01–0,5 (слабое); 0,6–1,0 (умеренное)	70
		$d > 2$	0,01–0,5 (слабое) либо отсутствует	
2	$T \in [-20; -11]$	$d \in [0; 1]$	1,1–2,0 (сильное)	35
			0,01–0,5 (слабое); 0,6–1,0 (умеренное)	65
		$d \in [1; 2]$	0,01–0,5 (слабое) либо отсутствует	70
		$d > 2$	отсутствует	90
3	$T < -21$	$d \in [0; 1]$	0,01–0,5 (слабое); 0,6–1,0 (умеренное)	40
		$d > 1$	отсутствует	90

Во взаимосвязи разработанные комбинации условий (табл. 3 и 4) можно представить в виде схемы $V \rightarrow I/V$, позволяющей определять вероятность возникновения обледенения и его интенсивность при условии, что обледенение возможно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Для анализа применимости разработанной схемы комбинации условий $V \rightarrow I/V$ на практике и подтверждения того, насколько она адекватно характеризует физические условия возникновения обледенения в атмосфере, проведено экспериментальное исследование морфологии полей параметров атмосферы, которые обуславливают возможность возникновения этого явления.

Заметим, что для апробации методов прогнозирования обледенения необходим богатый эмпирический материал, полученный непосредственно в условиях естественного обледене-

ния, что небезопасно, экономически нецелесообразно и связано с большими временными затратами. Поэтому в настоящее время такие экспериментальные исследования не проводятся.

В 60–70-х годах прошлого столетия были проведены немногочисленные эксперименты, в результате которых построены дискриминантные функции. Так, например, большое практическое значение имеет построенная по данным зондирования во Внуково (ст. 27612) дискриминантная функция, отделяющая случаи умеренного или сильного обледенения от случаев без обледенения в облаках:

$$L = -0,017H_{cb} - 0,488T + 0,875. \quad (6)$$

Выражение (6) было получено К.Г. Абрамовичем, Г.В. Васильевой и В.М. Прохоровой методами регрессионного анализа, при использовании которых отбор информативных метеорологических параметров проводился по расстоянию Махаланобиса [12].

Величина $L > 0$ соответствует области умеренного или сильного обледенения, а величина $L \leq 0$ – области отсутствия обледенения в облаках.

Подтверждение прогнозов с помощью линейной дискриминантной функции (6) показало ее применимость для различных районов ЕТС: общая оправдываемость прогнозов составила 75%, для умеренного и сильного обледенения – 79%, для отсутствия обледенения в облаках – 71%.

Обозначим разработанную схему комбинации условий условным наименованием Модель №1, а функцию (6) – Модель №2 и получим с их помощью количественные оценки показателей обледенения – вероятность возникновения и интенсивность.

В качестве исходных данных использовались ряды данных метеорологических наблюдений на станции 22113 (г. Мурманск) за февраль, всего 1816 сроков наблюдений с 2005 по 2016 год.

В ходе исследования мы ограничились синоптическими ситуациями, где высота нижней границы облачности составляла 100, 200, 300 и 600 м, а также сделали допущение, что значения температуры воздуха на этих высотах соответствуют значению температуры воздуха у земли.

Введенное ограничение обосновано тем, что наиболее часто обледенение наблюдается в облачности с высотой нижней границы до 600 м, а сделанное допущение обусловлено отсутствием однородных данных измерений температуры воздуха на высотах 100, 200, 300 и 600 м.

Далее рассмотрим полученные результаты.

Станция 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 100$ м

Характеристика условий возникновения обледенения, полученная с помощью моделей №1 и 2, представлена на рис. 2.

Раскроем содержание условных обозначений, представленных на рис. 2.

Общие обозначения:

T – температура воздуха;

d – дефицит точки росы;

Ψ_l – область слабого обледенения; 0,01–0,5 мм/мин.;

Ψ_m – область умеренного обледенения; 0,6–1,0 мм/мин.;

Ψ_s – область сильного обледенения; 1,1–2,0 мм/мин.

Модель №1:

G – распределение показателя наличия/отсутствия обледенения по методу Годске;

T_{is} – температура насыщения надо льдом.

Модель №2:

L – дискриминантная функция, характеризующая условия наличия/отсутствия обледенения.

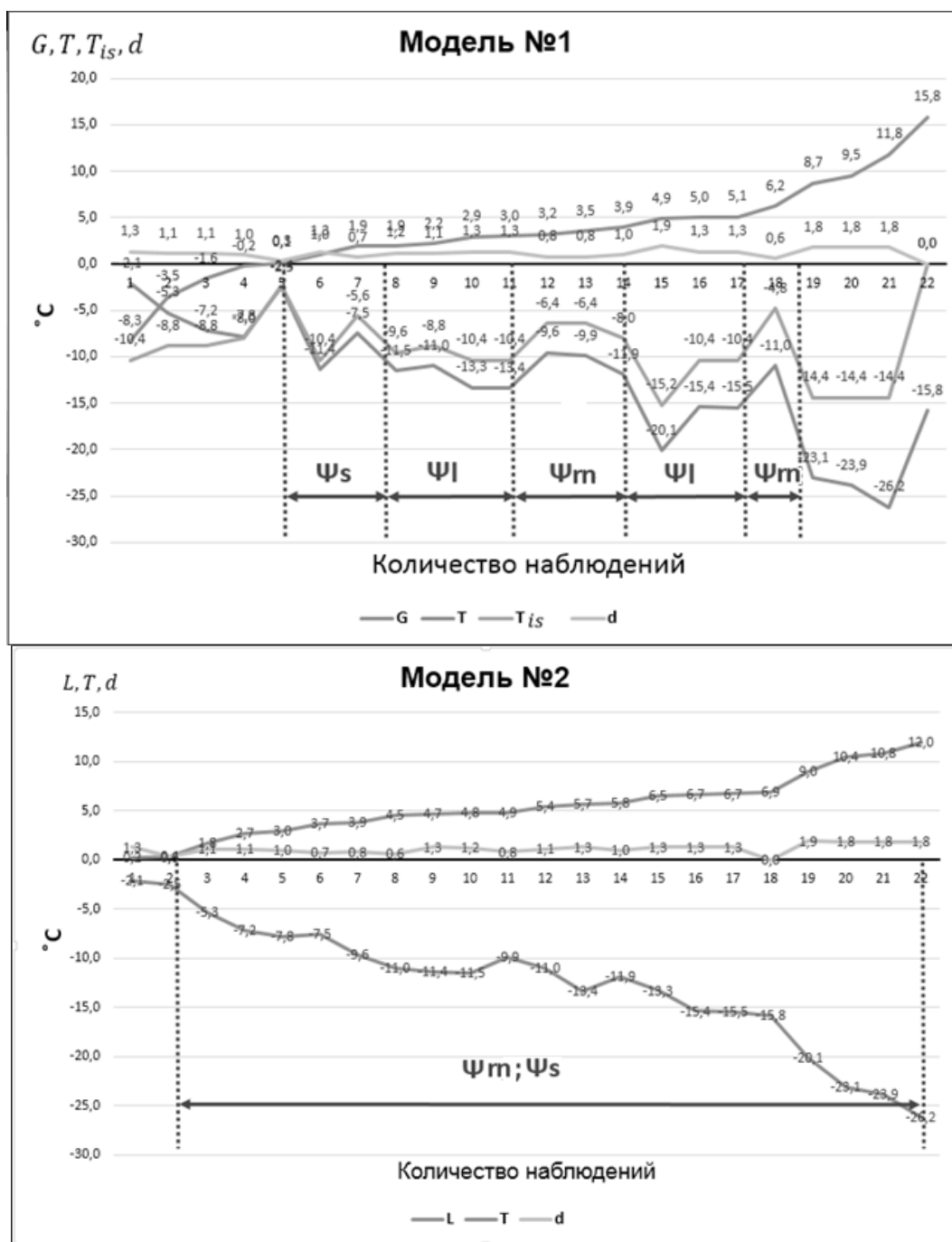


Рис. 2. Характеристика условий возникновения обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 100$ м

Результаты применения моделей №1 и 2 приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 100$ м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψ_l	Ψ_m	Ψ_s
Модель №1	23	77	32	27	14
Модель №2	9	91	—	91	

Из анализа табл. 5 видно, что с помощью Модели №2 по сравнению с Моделью №1 получается достаточно грубая оценка условий возникновения обледенения и не разделяются случаи слабого, умеренного и сильного обледенения.

Станция 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 200$ м

Характеристика условий возникновения обледенения в феврале при высоте нижней границы облачности 200 м представлена на рис. 3.

Результаты применения моделей №1 и 2 представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 200$ м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψ_1	Ψ_m	Ψ_s
Модель №1	18	82	60	12	10
Модель №2	12	88	—	88	

Станция 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 300$ м

Характеристика условий возникновения обледенения в феврале при высоте нижней границы облачности 300 м представлена на рис. 4.

Результаты применения моделей №1 и 2 приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 300$ м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψ_1	Ψ_m	Ψ_s
Модель №1	72	28	16	8	4
Модель №2	73	27	—	27	

Станция 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 600$ м

Характеристика условий возникновения обледенения в феврале при высоте нижней границы облачности 600 м представлена на рис. 5.

Результаты применения моделей №1 и 2 приведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 600$ м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψ_1	Ψ_m	Ψ_s
Модель №1	80	20	15	2	3
Модель №2	95	5	—	5	

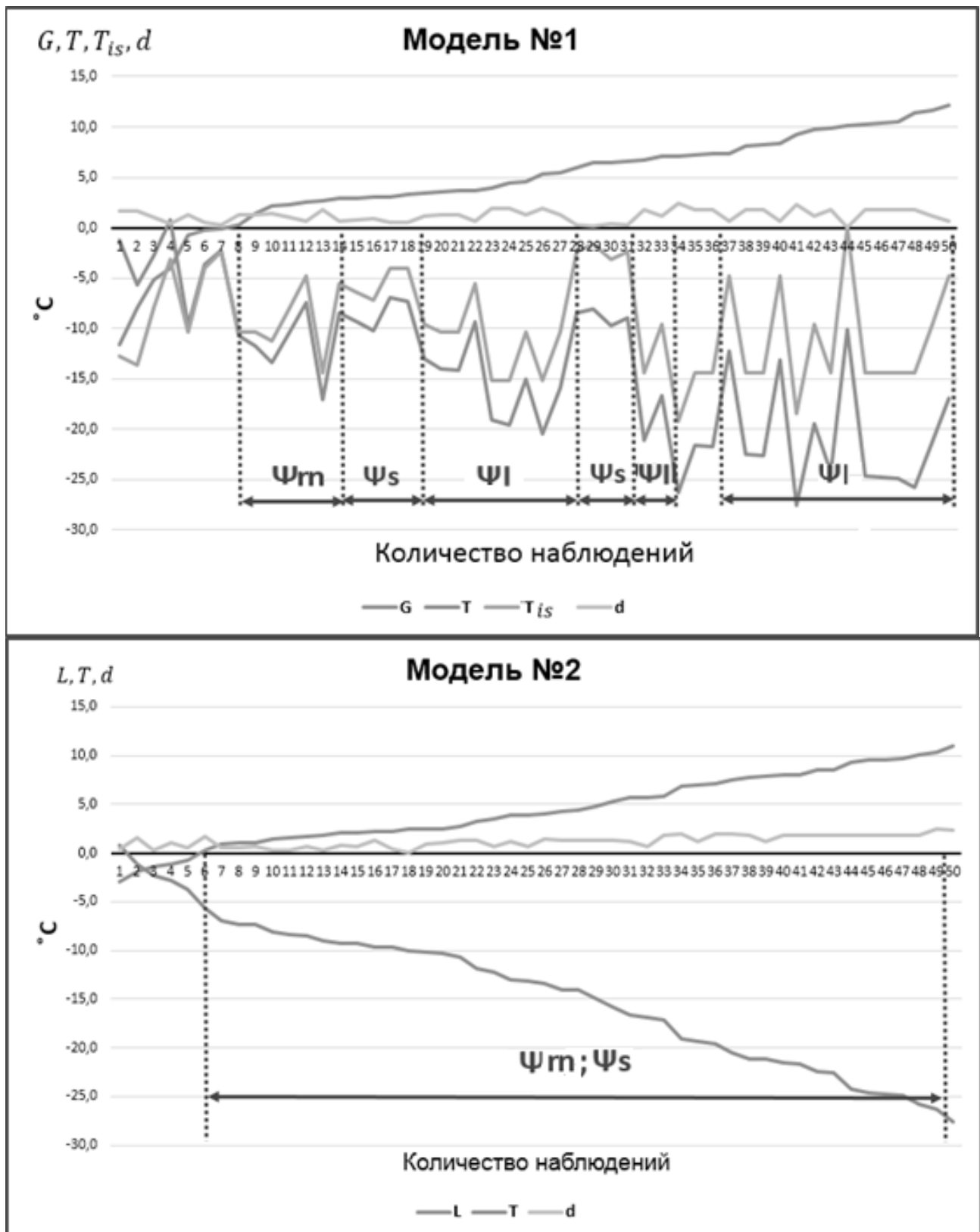


Рис. 3. Характеристика условий возникновения обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 200$ м

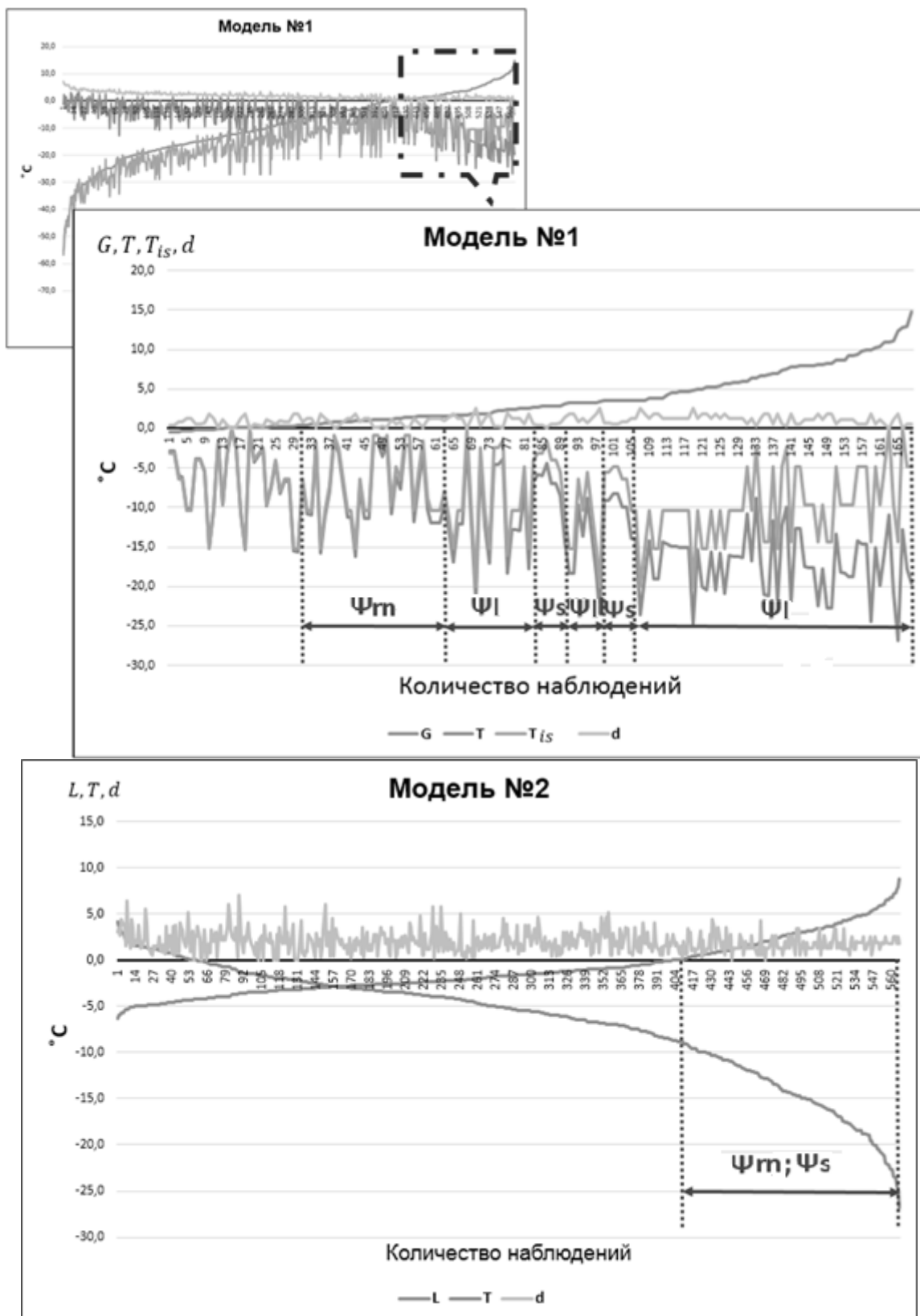


Рис. 4. Характеристика условий возникновения обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 300$ м

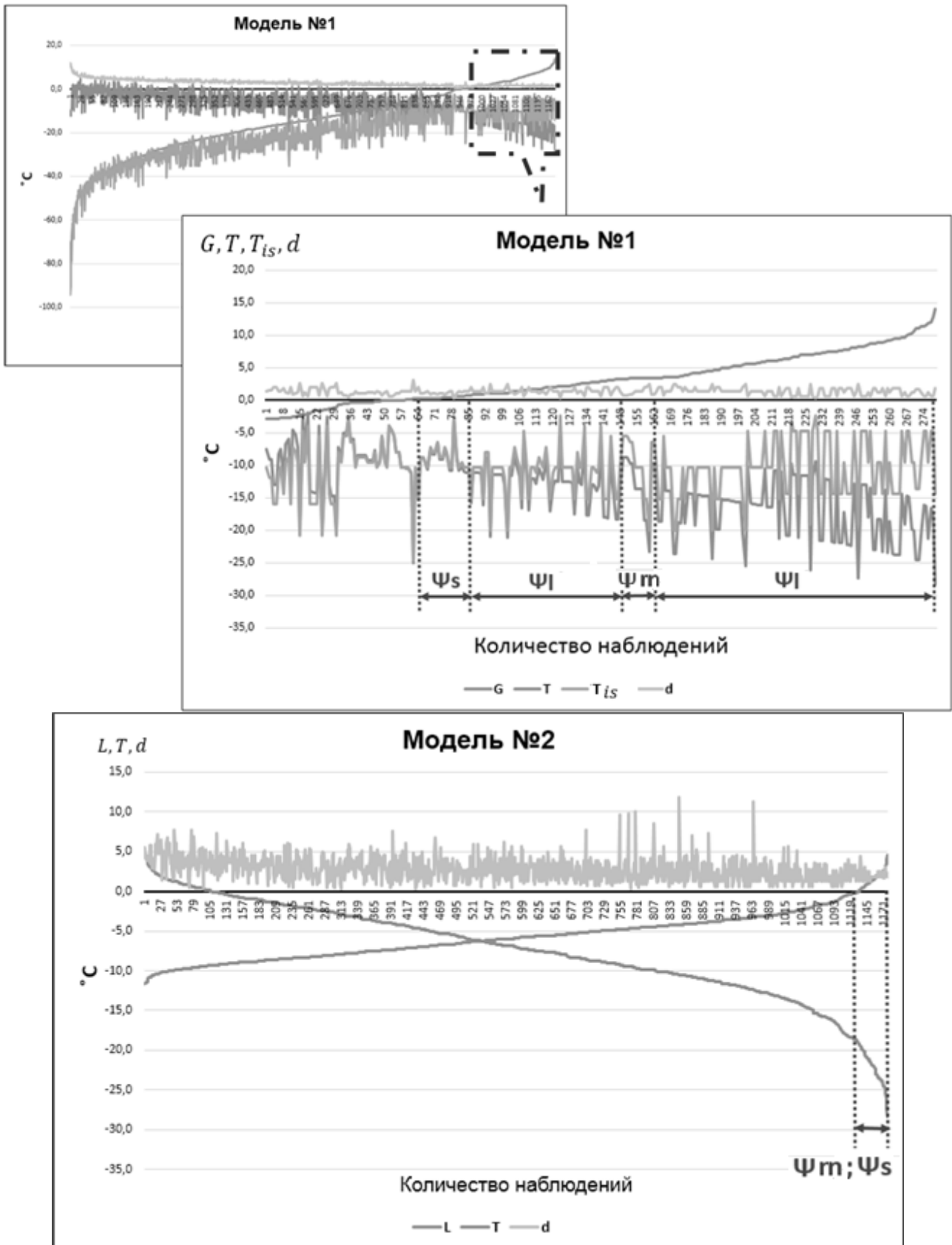


Рис. 5. Характеристика условий возникновения обледенения в феврале на станции 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 600$ м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В военно-прикладной метеорологии основой прогнозирования обледенения ЛА является определение метеорологических условий, благоприятствующих отложениям льда той или иной интенсивности. Такие условия формируются при наличии облачности, содержащей переохлажденные капли воды, и при определенных значениях температуры воздуха, соответствующих этой структуре облаков. Поэтому на практике прогнозируются потенциальные области, где высока вероятность возникновения обледенения в атмосфере, а не обледенения конкретного ЛА.

При прогнозировании обледенения беспилотных дозвуковых ЛА в условиях отсутствия инструментальных метеорологических наблюдений учет качественных признаков невозможен. Поэтому более предпочтительны объективные способы прогнозирования обледенения – метод NCER ($T \in [-16; 0]$, °C и $f > 63\%$), метод Годске (2) и метод дискриминантного анализа (6).

При построении схемы комбинации условий Модели №1 авторами учтены правила методов NCER и Годске и проведено экспериментальное сравнение с методом дискриминантного анализа – Модель №2. В целом Модель №2 показала некоторое завышение числа прогнозов умеренного и сильного обледенения по сравнению с Моделью №1.

Кроме того, анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Моделью №1 более адекватно описываются физические условия возникновения обледенения в атмосфере, чем Моделью №2, так как учитываются не только высота нижней границы облачности и температура воздуха, но и относительная влажность воздуха, дефицит точки росы, температура насыщения над льдом, а также рельеф местности и тип подстилающей поверхности.

2. С помощью Модели №2, в отличие от Модели №1, не разделяются случаи наличия обледенения различной интенсивности, а любое обледенение (при его наличии) относится одновременно к умеренному и/или сильному обледенению. Такой результат прогнозирования существенно ограничивает область допустимых решений на применение ЛА.

3. Модель №2 в большей степени применима для определения условий возникновения обледенения на высотах от 300 м, но в то же время по достоверности прогноза она уступает Модели №1.

Список используемых источников

1. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология: учебник. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 711 с.

2. *Хромов С.П., Петросянец М.А.* Метеорология и климатология: учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 527 с.

3. Руководство по практическим работам метеоподразделений авиации вооруженных сил». – М.: Воениздат, 1992. – С. 64–66, 285–291.

4. *Позднякова В.А.* Практическая авиационная метеорология: учеб. пособие. – Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. – 113 с.

5. *Голоспинкина Л.А.* Авиационная метеорология: лекции по курсу «Авиационная метеорология». – Ташкент: ТГАИ, 2005. – 83 с.

6. Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах / Г.П. Клеменков, Ю.М. Приходько, Л.Н. Пузырев, А.М. Харитонов // Теплофизика и аэромеханика. – Новосибирск: ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, 2008. – Вып. №4, т.2. – С.563–572.

7. *Шакина Н.П.* Метод прогноза зон возможного обледенения воздушных судов / Методический кабинет Гидрометцентра России. – М.: ГУ «Гидрометцентр России», 2009. – 6 с.
8. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред. К.Г. Абрамовича, А.А. Васильевой. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
9. *Богаткин О.Г.* Основы авиационной метеорологии: учебник. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2009. – 339 с.
10. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
11. *Кендалл М. Дж., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды: пер. с англ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. – 736 с.
12. *Еникеева В.Д., Солонин С.В.* Применение теории распознавания образов при решении задач авиационной метеорологии: учеб. пособие. – Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1979. – 69 с.
13. Пат. № 2580375 Рос. Федерация: МПК В64D 15/20. Дистанционный способ определения пространственных зон вероятного обледенения воздушных судов в режиме реального времени / В.В. Зуев, Д.П. Нахтигалова, А.П. Шелехов, Е.А. Шелехова, заявитель и патентообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН. – №2014154535/28; заявл. 30.12.2014; опубл. 10.04.2016, Бюлл. № 10.
14. *Дорофеев В.В., Степанов А.В., Гедзенко Д.В.* Научно-методический подход к расчету полетной дальности видимости для аэронавигации по правилам визуальных полетов // Навигация и гидрография. – 2016. – №44. – С.86–92.
15. Материалы с сайта. – URL: <http://flymeteo.org> (дата обращения: 5.08.16).

С.М. Беседин,
кандидат военных наук;
М.А. Кукушкин,
кандидат военных наук;
Д.Ю. Пономарёв

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНО-СТАЦИОНАРНЫХ ОРБИТ

Приведена методика баллистического проектирования спутниковых систем связи на локально-стационарных орбитах с учетом требуемого уровня целевого применения проектируемых спутниковых систем связи.

Ключевые слова: спутниковые системы связи.

Баллистическое проектирование современных спутниковых систем связи является сложной научно-технической задачей. Ее сложность объясняется необходимостью целенаправленного учета как чисто баллистических параметров спутниковой системы, так и целого ряда целевых (системных) характеристик, находящихся в прямой или косвенной зависимости от указанных баллистических параметров и отражающих эффективность применения той или иной группировки спутников по их целевому назначению.

Среди спутниковых систем связи важное место занимают системы обеспечения непрерывной круглосуточной связью абонентов в заданном районе земной поверхности. В настоящее время наиболее широкое применение для этих целей получили геостационарные орбиты, положительной характеристикой которых является обеспечение связью удаленных абонентов. Отличительные особенности этих орбит заключаются в следующем: большом размере зоны радиовидимости и ее практической неизменности относительно Земли в течение всего срока активного существования спутника; стабильности пространственного положения спутника, упрощающей применение многолучевых антенн на его борту для формирования узконаправленных лучей и контурных диаграмм направленности; устойчивости и высоком качестве радиосвязи; незначительности величины доплеровского смещения частоты; отсутствии необходимости переходов со спутника на спутник в процессе проведения сеансов связи; упрощении или полном исключении следящих приводов антенных систем в земных станциях.

В настоящей работе излагаются основные положения представленной методики, которая опирается на использование понятия так называемых локально-стационарных орбит (ЛСО) [1, 2]. Класс ЛСО интересен тем, что включает в качестве частного случая как геостационарную орбиту (единственную круговую орбиту в данном классе орбит), так и известную эллиптическую орбиту спутниковых систем связи типа «Молния». Одновременно данный класс орбит содержит бесконечное множество других эллиптических орбит, обладающих свойствами, схожими со свойствами указанных двух орбит, которые наиболее распространены при создании спутниковых систем связи.

Для заданных значений радиуса апогея r_A и наклона i радиус перигея r_P ЛСО определяется исходя из равенства орбитальной скорости V_A спутника в апогее и скорости точки, которая является концом геоцентрического радиуса-вектора длиной r_A , расположенного под углом $i < 90$ к плоскости экватора, жестко связанного и вращающегося вместе с Землей с угловой скоростью ω_3 :

$$V_A = \omega_3 \times r_A \times \cos i . \quad (1)$$

Известно, что скорость V_A спутника в апогее определяется из выражения [3]

$$V_A = \sqrt{\frac{2\mu \cdot r_{\Pi}}{r_A \cdot (r_A + r_{\Pi})}}, \quad (2)$$

где μ – гравитационная постоянная Земли.

Приравняв правые части формул (1) и (2) и решая выражение относительно r_{Π} , получим формулу для радиуса перигея ЛСО в виде

$$r_{\Pi} = \frac{\omega_3^2 \cdot r_A^4 \cos^2 i}{2\mu - \omega_3^2 \cdot r_A^3 \cos^2 i}. \quad (3)$$

Отсюда большая полуось a и эксцентриситет e ЛСО определяются по формулам (4):

$$a = \frac{r_A + r_{\Pi}}{2} = \frac{\mu \cdot r_A}{2\mu - \omega_3^2 \cdot r_A^3 \cos^2 i}; \quad e = \frac{r_A - r_{\Pi}}{r_A + r_{\Pi}} = 1 - \frac{\omega_3^2 \cdot r_A^3 \cos^2 i}{\mu}. \quad (4)$$

Существование ЛСО можно проиллюстрировать с помощью рис. 1.

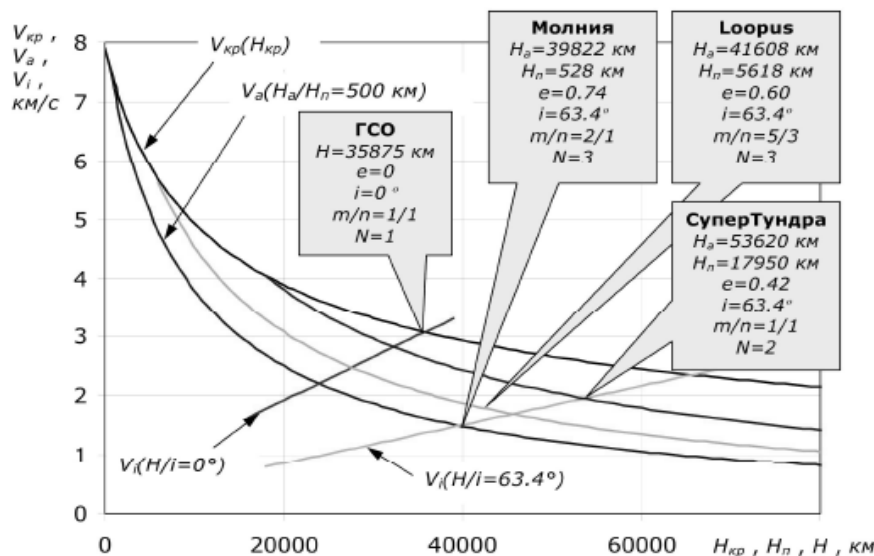


Рис. 1. К определению локально-стационарных орбит

На рис. 1 представлены зависимости скоростей:

- $V_{кр}$ ИСЗ на круговой орбите – от высоты $H_{кр}$ этой орбиты – $V_{кр}(H_{кр})$;
- V_a в апогее эллиптической орбиты – от высоты H_a апогея при фиксированных значениях высоты перигея $H_{\Pi}=500, 5500, 18\,000$ км – $V_a(H_a/H_{\Pi})$;
- V_i точки, являющейся концом вращающегося вместе с Землей геоцентрического радиуса-вектора, – от высоты H этой точки над поверхностью Земли при фиксированных углах $i = \{0^\circ; 63.4^\circ\}$ наклона радиуса-вектора к плоскости экватора – $V_i(H/i)$.

Находя на данном рисунке по заданным H_a и i точку пересечения прямой $H=H_a$ с графиком функции $V_i(H/i)$ и проводя через эту точку зависимость вида $V_a(H_a/H_{\Pi})$ до пересечения ее с графиком $V_{кр}(H_{кр})$, можно получить высоту перигея ЛСО (как абсциссу последней точки пересечения), соответствующую выбранным H_a и i .

В общем случае использование ЛСО позволяет осуществлять обзор заданного локального района Земли на одном или нескольких последовательных витках спутника. В связи с этим практический интерес представляют ЛСО, являющиеся одновременно геосинхронными. Один спутник на такой орбите обеспечивает за период повторяемости трассы спутника (n эффективных суток) проведение m сеансов связи с абонентами заданного района Земли.

«Расставляя» вдоль трассы одиночного такого спутника необходимое число дополнительных спутников, можно осуществить непрерывность обеспечения связью абонентов заданного района с помощью такой спутниковой системы. При этом можно говорить о том, что в силу выбора формы ЛСО обеспечивается максимум длительности сеансов связи, а следовательно, и минимум количества указанных дополнительных спутников для построения спутниковой системы связи.

Известно, что геосинхронными орбитами называются такие орбиты, при движении по которым трасса спутника замыкается через конечный промежуток времени – период $T_{тр}$ повторяемости трассы:

$$T_{тр} = m \cdot T_{др} = n \cdot T_{эф}, \quad (5)$$

где $T_{др}$ – драконический период обращения ИСЗ;

$T_{эф}$ – эффективный период вращения Земли с учетом прецессии орбиты ИСЗ (промежуток времени между двумя последовательными прохождением фиксированной точки экватора через восходящий узел орбиты спутника);

m, n – взаимно простые целые числа, равные числу витков ИСЗ и числу эффективных суток в периоде $T_{тр}$.

Геостационарные орбиты и эллиптические орбиты спутников типа «Молния» являются частным случаем локально-стационарных геосинхронных орбит, реализуемых соответственно при $m=n=1$ и $m=2, n=1$. Заметим также, что, по-видимому, не случайно орбиты двух других известных спутниковых систем связи («СуперТундра», «Loopus»), реализуемых на эллиптических орбитах, в той или иной мере также близки к параметрам локально-стационарных геосинхронных орбит (см. рис. 1).

При движении по высокоэллиптической ЛСО за счет высокого апогея спутник обеспечивает связь в течение длительного периода времени. Так, например, сеанс связи со спутником на орбите типа «Молния» (апогей около 40 000 км, перигей 460 км) имеет продолжительность около 8–10 ч, а система из трех таких спутников позволяет обеспечить глобальную круглосуточную связь.

В последние годы возрос интерес к эллиптическим орбитам на средних высотах (с более низкими апогеем и перигеем). Спутниковые системы, построенные на средневысотных эллиптических орбитах, обычно предназначаются для обеспечения связью относительно небольших по размерам регионов Земли. Проигрывая по сравнению с высокоэллиптическими орбитами в продолжительности сеансов наблюдения, системы на средневысотных эллиптических орбитах заметно выигрывают в энергетических характеристиках. Использование ЛСО дает возможность проводить оптимизацию в широком диапазоне возможных реализаций эллиптических орбит, при оптимизации, в том числе, и по энергетическим характеристикам, необходимым для выведения спутников на орбиты.

Для расчета локально-стационарных геосинхронных орбит можно использовать следующие выражения для драконического периода $T_{др}$ обращения спутника, эффективного периода $T_{эф}$ вращения Земли и углового смещения $\delta\Omega$ восходящего узла орбиты спутника за один виток [3]:

$$T_{др} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\varepsilon}{\mu} \cdot \left[3 - \frac{5}{2} \cdot \sin^2 i - e \cdot \cos \omega \cdot (1 - 5 \cdot \sin^2 i) \right] \right\}, \quad (6)$$

$$T_{эф} = \frac{2\pi + \frac{m}{n} \cdot \delta\Omega}{\omega_3}, \quad \delta\Omega = - \frac{2\pi}{a^2 (1-e^2)^2} \cdot \frac{\varepsilon}{\mu} \cdot \cos i,$$

где ε – постоянная, учитывающая сжатие Земли.

Подставляя значения из выражений (5) и (6) в формулу (1), с учетом того, что для ЛСО $\omega = \pm 90^\circ$, можно получить равенство

$$\frac{\omega_3 \cdot T_{др} - \delta\Omega}{2\pi} = \frac{n}{m}. \quad (7)$$

При заданных наклонении i , числе m витков спутника и числе n суток в периоде повторяемости трассы спутника равенство (7) представляет собой уравнение относительно неизвестной величины радиуса r_A апогея (высоты H_A апогея) ЛСО.

Заметим, что приведенные выше формулы (4) позволяют однозначно рассчитать форму орбиты ЛСО (большую полуось и эксцентриситет) по заданным значениям высоты апогея и наклонения орбиты. В случае использования геосинхронных локально-стационарных орбит для нахождения высоты апогея необходимо решить уравнение (7) при известном наклонении орбит и кратности геосинхронной орбиты. Если выбор наклонения эллиптической орбиты решается во всех случаях однозначно в пользу значения 63,4 град, обеспечивающего стабильность линии апсид, то выбор высоты апогея (кратности геосинхронной орбиты) в указанных выше случаях не является столь же очевидным вопросом и должен осуществляться, по-видимому, с учетом других соображений, связанных с особенностями технической реализации спутниковых систем связи. Рассмотрим, какие конкретно идеи могут быть положены в основу решения этого вопроса.

По сути дела, нам необходимо получить оценку высоты апогея проектируемой спутниковой системы связи в зависимости от требуемого уровня целевого применения спутниковых систем связи при заданных характеристиках их технической реализации (характеристиках приема-передающего тракта).

Одним из важнейших показателей эффективности целевого применения спутниковых систем связи является их *пропускная способность*. Данный параметр наиболее полно характеризует такие свойства проектируемой системы, как объем передаваемой информации через спутник, перечень видов передаваемой информации, качество передачи и является основным проектным параметром, используемым в качестве исходного при создании телекоммуникационных спутниковых систем.

Пропускная способность системы C определяется формулой Шеннона [4]:

$$C = \Delta f_{ств} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right), \quad (8)$$

где $\Delta f_{ств}$ – полоса пропускания спутниковой системы (одного ствола);

$\frac{P_c}{P_{ш}}$ – отношение мощности сигнала (P_c) к мощности шума ($P_{ш}$) на входе приемника земной станции (отношение «сигнал-шум»).

Из формулы (8) выразим отношение «сигнал-шум»:

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = 2^{\frac{C}{\Delta f_{ств}}} - 1. \quad (9)$$

Данное отношение «сигнал-шум» может быть одновременно определено через энергетические и геометрические характеристики приема-передающего тракта спутниковой системы связи следующим образом.

Мощность сигнала на входе приемника земной станции определяется как

$$P_c = W \cdot S_{эф.пр}. \quad (10)$$

Здесь W – плотность потока мощности, создаваемой у поверхности Земли;

$S_{эф.пр}$ – эффективная площадь приемной антенны земной станции, при этом

$$S_{\text{эф. пр.}} = S_{\text{р. пр.}} \cdot q_{\text{пр.}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{а. пр.}}^2 \cdot q_{\text{пр.}}, \quad (11)$$

где $S_{\text{р. пр.}}$ – геометрическая площадь «раскрыва» приемной антенны;
 $q_{\text{пр.}}$ – коэффициент использования поверхности принимающей антенны (для антенн параболического типа коэффициент $q_{\text{пр.}}=0,5 \div 0,7$, а для антенн рупорно-параболического типа – $q_{\text{пр.}}=0,7 \div 0,8$ [5]);
 $D_{\text{а. пр.}}$ – диаметр зеркала приемной антенны.

Мощность шума на входе приемника земной станции

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{ств}}, \quad (12)$$

где k – постоянная Больцмана, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт / (Гц · град);
 T_{Σ} – эквивалентная шумовая температура всей приемной системы с учетом внутренних и внешних шумов.

Суммарная температура шума T_{Σ} определяется в основном выбранным типом малошумящего усилителя приемного тракта и составляет обычно от 50 до 3000 К.

Плотность потока мощности, создаваемая у поверхности Земли,

$$W = \frac{E}{4\pi \cdot d^2 L_{\text{доп}}}, \quad (13)$$

где E – эквивалентная изотропно излучаемая мощность;
 d – наклонная дальность (расстояние между ИСЗ и земной станцией);
 $L_{\text{доп}}$ – дополнительные потери энергии сигнала вследствие поглощения радиоволн в атмосфере, рефракции, неточности наведения антенн и пр.

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность бортовой передающей станции

$$E = P_{\text{пер}} \cdot \mu_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}}, \quad (14)$$

где $P_{\text{пер}}$ – эффективная мощность на выходе передатчика;
 $\mu_{\text{пер}}$ – коэффициент передачи (по мощности) волноводного тракта;
 $G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления передающей антенны.

Вместо коэффициента усиления $G_{\text{пер}}$ могут быть использованы геометрические характеристики бортовой передающей антенны, связанные соотношением [6]

$$G = \frac{49\,000 \cdot q_{\text{пер}}}{\Phi_0 \cdot \Phi_1}, \quad (15)$$

где $q_{\text{пер}}$ – коэффициент использования поверхности передающей антенны;
 Φ_0 и Φ_1 – углы раскрыва диаграммы направленности по плоскостям большой и малой осей сечения на уровне мощности 3 дБ.

Определим отношение сигнала-шум $\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}$ на входе приемника земной станции из зависимостей (10) и (12):

$$\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} = \frac{W \cdot S_{\text{эф. пр.}}}{k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{ств}}}. \quad (16)$$

Приравнивая (9) и (16) с учетом также выражений (11), (13)–(15) получим

$$\frac{3065 \cdot P_{\text{пер}} \cdot \mu_{\text{пер}} \cdot q_{\text{пер}} \cdot q_{\text{пр}} \cdot D_{\text{а.пр.}}^2}{k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{ств}} \cdot d^2 \cdot L_{\text{доп}} \cdot \Phi_0 \cdot \Phi_1} = 2^{\frac{c}{\Delta f_{\text{ств}}}} - 1. \quad (17)$$

Из формулы (17) выразим максимальную наклонную дальность в зависимости от пропускной способности системы при фиксированных характеристиках приемо-передающего тракта:

$$d(C / \overrightarrow{X_{\text{пер}}}, \overrightarrow{X_{\text{пр}}}) = D_{\text{а.пр.}} \sqrt{\frac{3065 \cdot P_{\text{пер}} \cdot \mu_{\text{пер}} \cdot q_{\text{пер}} \cdot q_{\text{пр}}}{k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{ств}} \cdot L_{\text{доп}} \cdot \Phi_0 \cdot \Phi_1 \cdot \left(2^{\frac{c}{\Delta f_{\text{ств}}}} - 1\right)}}, \quad (18)$$

где $\overrightarrow{X_{\text{пер}}}$ – вектор характеристик бортовой аппаратуры передающего тракта, причем $\overrightarrow{X_{\text{пер}}} = (P_{\text{пер}}, \mu_{\text{пер}}, q_{\text{пер}}, \Phi_0, \Phi_1, \Delta f_{\text{ств}})$;
 $\overrightarrow{X_{\text{пр}}}$ – вектор характеристик наземной абонентской приемной станции, при этом $\overrightarrow{X_{\text{пр}}} = (T_{\Sigma}, D_{\text{а.пр.}}, q_{\text{пр}})$.

Зависимость (18) максимальной наклонной дальности от пропускной способности системы может быть непосредственно использована для оценки – по крайней мере, в первом приближении – высот апогея (при заданном минимально допустимом угле места), предпочтительных для создания проектируемой спутниковой системы связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получаемые таким образом значения высот апогея ЛСО могут служить, посредством использования выражений (4), той опорной информацией, которая характеризовала бы предпочтительные варианты орбитального построения перспективных спутниковых систем связи в зависимости от требуемого уровня пропускной способности системы при заданных характеристиках приемо-передающего тракта.

Список используемых источников

1. *Разумный Ю.Н.* Локально стационарные орбиты искусственных спутников Земли // Труды XXV чтений К.Э. Циолковского (Калуга, 11–14 сентября 1990 г.). – М.: ИЕЕТ АН СССР, 1991. – С. 56.
2. Пат. РФ на изобретение № 2059540. Способ формирования системы локального обзора поверхности планеты / Разумный Ю.Н. – С приоритетом от 08.10.87, Бюл. №13 от 10.05.96.
3. *Эльясберг П.Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1965.
4. *Зюко А.Г.* Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1986.
5. Основы технического проектирования систем связи через ИСЗ / под ред. А.Д. Фортушенко. – М.: Радио и связь, 1970.
6. *Машибиц Л.М.* Компьютерная картография и зоны спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 2000.

С.А. Власов,
кандидат техн. наук;
А.Т. Жаткин,
кандидат техн. наук;
Т.А. Житников;
А.В. Кульвиц,
кандидат техн. наук

СИНТЕЗ ОРБИТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЛЛИСТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ГРУПП КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрен вопрос орбитального построения систем космического аппарата (КА) с использованием баллистически связанных групп. Проведены расчет и анализ основных геометрических характеристик движения КА в составе баллистически связанной группы под действием возмущающих факторов.

Ключевые слова: космический аппарат, орбитальная группировка, баллистически связанная группа КА, периодический обзор поверхности Земли.

Активное развитие систем КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в радиолокационном диапазоне с использованием баллистически связанных групп (БСГ) – образований из нескольких КА (не менее двух), наибольшее расстояние между которыми на всем интервале орбитального полета существенно (на порядки) меньше длины витка орбиты и которые объединены общностью решаемых задач, открывает качественно новые возможности [4].

Формирование БСГ КА обусловлено реализацией различных радиолокационных методов. Так, например, при создании систем КА ДЗЗ двойного назначения построение КА в составе БСГ позволяет реализовать не только разностно-дальномерный метод определения местоположения источника радиоизлучения, но и метод интерферометрический, обеспечивающий значительно более высокую точность определения координат РЭС. Такие системы КА широко используют США (системы White Cloud), Китай (Yaogan), Германия и др. [1, 6].

Вопросам баллистического построения систем КА с использованием БСГ в нашей стране и за рубежом уделяется повышенное внимание [7, 9, 14, 15].

С точки зрения классификации систем КА с использованием БСГ – это системы периодического обзора, но в качестве структурного элемента выступает не одиночный КА, а БСГ КА. В связи с этим методы и алгоритмы решения задачи синтеза и анализа таких систем КА будут другими, с новыми требованиями и ограничениями. В ряде случаев применительно к системе КА с использованием БСГ КА – это повышенные требования к конфигурации треугольника, образованного КА, и т.д. [4].

Системы КА периодического обзора строятся с учетом особенностей движения КА относительно вращающейся Земли. При этом используются следующие способы построения структуры систем [3, 5]:

- изомаршрутные (одно- или многомаршрутные);
- изомаршрутные со сдвигом по долготе;
- фронтальные системы КА.

Для двух основных классов систем КА (непрерывного и периодического) разработанные методы решения задачи синтеза и анализа существенно различаются. Но вместе с тем существует ряд особенностей, которые присущи обоим классам:

- известные способы построения систем КА характеризуются правильным геометрическим построением;
- оптимизация орбитальных структур проводится на ограниченном множестве, в пределах выбранного класса;
- системам КА со слабой симметрией, так называемым «диссимметричным», посвящена работа [5], но в настоящее время, получен ряд структур, обладающих лучшими по сравнению с кинематически правильными системами и «цепочками» характеристиками;
- варианты структур глобального непрерывного обзора и структур периодического обзора, известные в настоящее время, являются локально-оптимальными.

Все указанные особенности построения БСГ КА необходимо учитывать на этапах баллистического проектирования систем КА с использованием БСГ [4].

Синтезу систем КА периодического наблюдения на сегодняшний день посвящены работы следующих ученых: П. Мамона, Г. Можаяева, Ю. Разумного, С. Власова, В. Саульского, В. Милованова, О. Нестеренко. Вместе с тем, как отмечается в ряде работ [9, 12], к настоящему времени теория синтеза орбитального построения не имеет общих решений. В математической постановке – это поиск глобального экстремума, при котором возникают трудности с критериальными функциями – большое количество переменных, которые трудно дифференцируемы и имеют множество разрывов и не задаются аналитически [10]. Поэтому предлагаемые в наше время варианты орбитального построения носят локально-оптимальный характер.

Таким образом, задача синтеза систем КА ДЗЗ с использованием БСГ КА усложняется добавлением новых требований и ограничений.

Рассмотрим вариант орбитального построения трех КА в составе БСГ. Обозначим номер КА индексами 1–3 (табл.1). Один из вариантов рационального орбитального построения КА в составе БСГ представлен в табл.1.

Таблица 1

Структура баллистически связанной группы КА

Номер КА	a , км	e	i , град	u , град	ω , град	Ω , град
1	7480,5	0,0103627	63,4	0	270	0
2	7480,5	0,0103627	63,4	1	270	0
3	7480,5	0,0103627	63,1	1	240	0.8

На примере данного орбитального построения рассмотрим требования к конфигурации треугольника, образованного БСГ КА. Обозначим: $O_j(x_j, y_j, z_j)$ – положение КА 1-3 в начальный момент времени t_0 , где j – номер КА; d_{12}, d_{13}, d_{23} – линейная дальность между КА 1-2, 1-3, 2-3 соответственно; γ_j – угол между вершинами треугольника, образованного БСГ КА; φ – угол между нормалью к поверхности Земли и ее проекцией на плоскость, в которой лежит треугольник, образованный БСГ КА (рис.1).

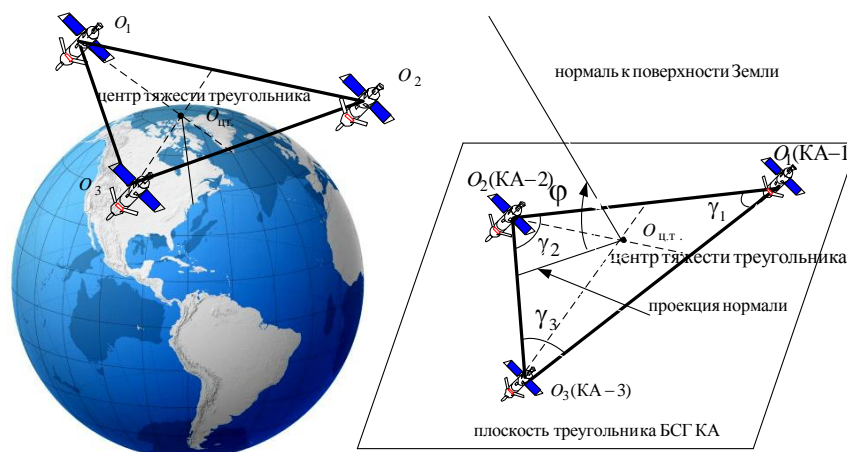


Рис.1. Геометрические характеристики баллистически связанной группы КА

Геометрические характеристики $d_{12}(t), d_{13}(t), d_{23}(t), \gamma_j(t), \phi(t)$ полностью определяют динамику относительного движения треугольника, образуемого БСГ КА.

Таким образом, требования к конфигурации БСГ КА можно представить системой неравенств (1):

$$\begin{cases} d_{12}(t), d_{13}(t), d_{23}(t) < d_{np}, \\ \gamma_j(t) < \gamma_{np}, \\ \phi(t) < \phi_{np}, \end{cases} \quad (1)$$

где $j=1\dots 3$ номер КА 1-3.

В качестве характерной точки треугольника, образованного БСГ КА, примем центр тяжести треугольника. Тогда для случая, когда движение центра масс КА рассматривается в АГЭСК, получим координаты центра тяжести треугольника БСГ КА

$$O_{ц.т.} \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}, \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \right).$$

Приведем основные формулы для расчета геометрических характеристик БСГ КА, с учетом принятых обозначений:

$$\begin{aligned} d_{12} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \\ d_{13} &= \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}, \\ d_{23} &= \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \gamma_1 = \arccos\left(\frac{d_{12}^2 + d_{13}^2 - d_{23}^2}{2d_{12}d_{13}}\right) \\ \gamma_2 = \arccos\left(\frac{d_{23}^2 + d_{12}^2 - d_{13}^2}{2d_{23}d_{12}}\right), \\ \gamma_3 = \arccos\left(\frac{d_{13}^2 + d_{23}^2 - d_{12}^2}{2d_{13}d_{23}}\right) \end{cases}$$

$$\sin \phi = \left(\frac{|Al + Bm + Cn|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} + \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} \right).$$

Здесь $l = -\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$, $m = -\frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$, $n = -\frac{z_1 + z_2 + z_3}{3}$, а A, B, C – коэффициенты уравнения плоскости, в которой лежит БСГ КА.

Рассматривая движение центра масс КА в составе БСГ в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) и используя систему дифференциальных уравнений (2), получим геометрические характеристики БСГ КА на интервале одного витка, представленные на рис. 2 и 3:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{\mu}{r^3} + \left[-\frac{3\pi_2}{2r^4} \left(1 - 5\frac{z^2}{r^2} \right) + \frac{5\pi_4}{8r^6} \left(3 - (42 - 63\frac{z^2}{r^2}) \frac{z^2}{r^2} \right) \right] \frac{x}{r} - \frac{c_x S}{2m} \rho V^2, \\ \ddot{y} = -\frac{\mu}{r^3} + \left[-\frac{3\pi_2}{2r^4} \left(1 - 5\frac{z^2}{r^2} \right) + \frac{5\pi_4}{8r^6} \left(3 - (42 - 63\frac{z^2}{r^2}) \frac{z^2}{r^2} \right) \right] \frac{y}{r} - \frac{c_x S}{2m} \rho V^2, \\ \ddot{z} = -\frac{\mu}{r^3} + \left[-\frac{3\pi_2}{2r^4} \left(3 - 5\frac{z^2}{r^2} \right) + \frac{5\pi_4}{8r^6} \left(30 - (70 - 63\frac{z^2}{r^2}) \frac{z^2}{r^2} \right) \right] \frac{z}{r} - \frac{c_x S}{2m} \rho V^2, \\ \dot{x} = V_x, \\ \dot{y} = V_y, \\ \dot{z} = V_z, \end{cases} \quad (2)$$

где x, y, z ,
 V_x, V_y, V_z , – координаты и проекции скорости центра масс КА в АГЭСК;
 c_x – коэффициент силы лобового сопротивления;
 S – площадь Миделя;
 m – масса КА.

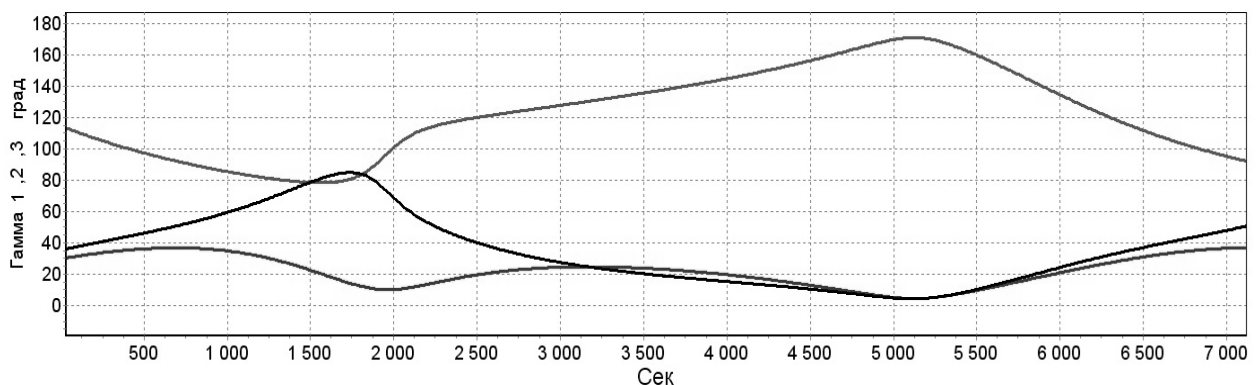


Рис.2. Геометрические характеристики конфигурации БСГ КА на плоскости в пределах интервала одного витка

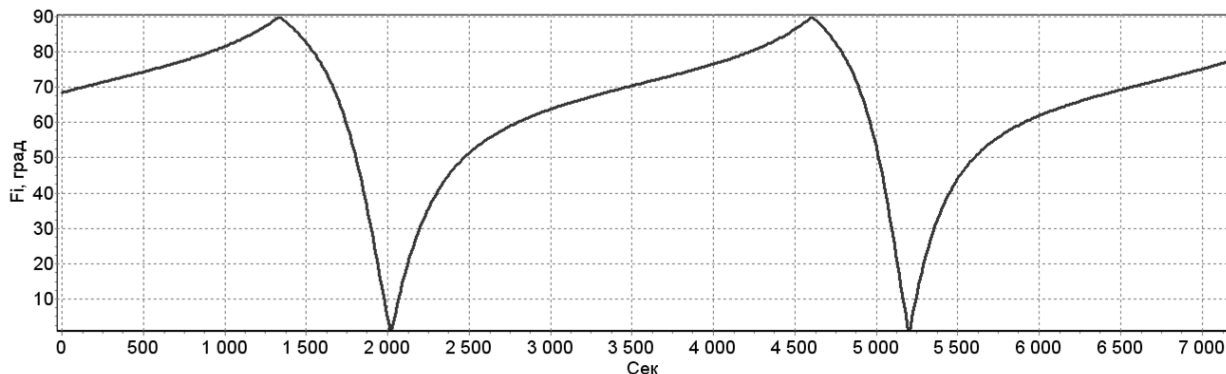


Рис.3. Ориентация плоскости БСГ КА к поверхности Земли на интервале одного витка

Требования к геометрическим характеристикам или конфигурации БСГ КА определяются методом радиолокации. Для их реализации необходимо использовать орбиты с разными геометрией и положением в пространстве, а это, в свою очередь, порождает ряд трудностей при синтезе системы КА ДЗЗ с использованием БСГ. По сути, требования к БСГ противоречат методам и алгоритмам синтеза системы КА периодического обзора. Так, в их основе лежит поиск оптимальной структуры на узком множестве (орбиты круговые, с одинаковым радиусом и наклоном). Кроме того, задача выбора начального положения КА в составе БСГ в настоящее время не решена. Предварительные результаты моделирования геометрических характеристик БСГ КА, представленные на рис.2 (конфигурация БСГ КА на плоскости) и рис.3 (ориентация плоскости БСГ КА к поверхности Земли) для различных вариантов начального положения КА в составе БСГ КА, показывают, что улучшение характеристик на плоскости в ряде случаев ведет к ухудшению ориентации плоскости БСГ КА. Более того, с учетом возможностей средств выведения и реализации на практике таких систем КА варианты начального положения КА в БСГ, которые удовлетворяли требованиям (1), могут отсутствовать. В этом случае, для заданного диапазона орбит КА, оптимизация начального положения КА в составе БСГ КА может быть сведена к минимизации времени, при котором требования (1) не выполняются.

Следующим этапом баллистического построения системы КА ДЗЗ с использованием БСГ КА является синтез структуры, в котором БСГ КА выступает в качестве структурного элемента. При этом те требования, которые не могут быть выполнены при формировании БСГ КА, необходимо учитывать при решении задачи синтеза систем КА ДЗЗ.

Для сформированного варианта БСГ (табл.1) произведен расчет необходимого количества БСГ и общего числа КА в системе для обеспечения требуемой периодичности наблюдения широтного пояса $R_{\psi} \in [-70, 70]$. Результаты приведены в табл.2.

Таблица 2

Периодичность наблюдения БСГ КА

Периодичность наблюдения, ч	1,5	3	4	5
Количество БСГ КА (общее количество КА)	12 (36)	6 (18)	5 (15)	4 (12)

Таким образом, решение синтеза системы КА с использованием БСГ КА сводится к решению следующих комплексных оптимизационных задач:

– определения целевой задачи (целевой функции), стоящей перед системой КА с использованием БСГ КА;

- формирования требований и ограничений, которые возникают перед КА в составе БСГ;
- выбора и обоснования параметров орбит с учетом стоящей перед системой целевой задачи, а также поиска начального положения каждого КА в составе БСГ, которая будет удовлетворять данные требования и ограничения;
- выбора и обоснования модели движения центра масс КА в составе БСГ;
- разработки методологического аппарата решения задачи синтеза систем КА с использованием БСГ.

Список используемых источников

1. *Агапов В.А.* Два новых спутника для NRO // *Новости космонавтики.* – 2002. – №5. – С.11–12.
2. *Власов С.А., Кульвиц А.В., Киселев В.В.* Алгоритм расчета характеристик применения космических аппаратов для наблюдения объектов в околоземном космическом пространстве // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – 2010. – Вып. 645, т. 2. – С. 82–92.
3. *Власов С.А., Кульвиц А.В., Мосин Д.А.* Анализ пространственно-временных характеристик при решении задачи периодического наблюдения системой КА // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – 2010. – Вып. 654, т. 2. – С. 72–75.
4. Баллистическое проектирование систем космических аппаратов: учеб. пособие / С.А. Власов, А.В. Кульвиц, И.Ю. Кубасов, Д.А. Мосин. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 86 с.
5. *Горбулин В.И.* Оптимизация орбитального построения глобальных космических систем наблюдения. – СПб.: МО РФ, 2001. – 189 с.
6. *Кучейко А.В.* USA-160: ситуация проясняется // *Новости космонавтики.* – 2002. – №8. – С.44–47.
7. *Лобанов А.Г., Семункина В.И.* К вопросу о баллистическом построении при проведении интерферометрической съемки // *Космонавтика и ракетостроение.* – 2012. – №5. – С.41–47.
8. Основы теории полета летательных аппаратов / Н.Ф. Аверкиев, С. А. Богачев, С. А. Васьков и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 242 с.
9. *Овчинников М.Ю., Ткачев С.С.* Влияние слабых возмущений на относительное движение двух спутников // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша.* – 2005. – С. 5–7.
10. *Попович П.Р., Скребушевский Б.С.* Баллистическое проектирование космических систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
11. *Разумный Ю.Н.* Синтез орбитальных структур спутниковых систем периодического обзора. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 240 с.
12. *Власов С.А., Мамон П.А.* Теория полета космических аппаратов: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
13. *Можжаев Г.В.* Синтез орбитальных структур спутниковых систем: Теоретико-групповой подход. – М.: Машиностроение, 1989. – 303 с.
14. *H.Fiedler, G.Krieger* Close formation flight of passive receiving micro-satellites. // *The 18th International Symposium on Space Flight Dynamics, Munich, Germany, 11–15 October.* – 2004. – P.23–26.
15. *Clohessy W.H. and Wiltshire R.S.* Terminal guidance system for satellite rendezvous // *Journal of Aerospace Science.* – 1960. – Vol.27. – P.653–658.

В.Ф. Волков,
доктор военных наук, профессор;
Ю.А. Жигулин;
А.А. Толмачев,
кандидат военных наук

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНТУРА СИСТЕМЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДВОЙНОЙ РАНДОМИЗАЦИИ

В статье предложены два подхода к обоснованию структуры системы информационного обеспечения (СИО), при реализации которых задача баллистического обеспечения организационно-технических систем (ОТС) гарантированно выполняется за заданное время с заданной вероятностью. Первый подход базируется на учете специфики движения активных подвижных объектов (АПО), входящих в структуру ОТС. Второй подход учитывает нечеткий характер требований к результатам функционирования СИО, неизбежный для ранних стадий жизненного цикла ОТС.

Ключевые слова: рациональная структура, гарантированная вероятность, стохастический индикатор, ошибки измерения, баллистические данные, технологический цикл управления, план назначений.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] показано, что для эффективного применения космических средств в интересах действий войсковых формирований должна быть создана система баллистического обеспечения применения (БОПр) космических средств. Система информационного обеспечения (СИО), которую необходимо включить в структуру БОПр, в настоящее время находится в стадии проектирования. Задача обоснования требований к параметрам СИО относится к классу обратных задач теории эффективности.

Обратные задачи могут быть сгруппированы в три класса: обоснование требований к структуре СИО (структурный синтез), обоснование требований к ЭТХ СИО (параметрический синтез), обоснование требований к организации ЦПФС (алгоритмический синтез) [3]. При этом в качестве основного показателем эффективности рассматривается вероятность $P_{дц}$ достижения цели в операции. Для решения задач синтеза используется либо критерий оптимальности, либо критерий превосходства, либо критерий пригодности. При реализации критерия пригодности задача не имеет единственного решения, так как в соответствии с этим критерием качества сравниваемых объектов считаются одинаковыми для некоторых диапазонов значений показателей их свойств. В ряде случаев задача синтеза может быть решена методами «математического программирования» [2]. При этом существенное практическое значение имеют точность и достоверность исходных данных для формулируемых оптимизационных задач.

Анализ информации, необходимой для решения вышеупомянутых задач, показывает, что на определенной стадии вычислений должны проводиться вероятностные расчеты. Это обусловлено тем, что необходимо учитывать стохастическую природу ряда параметров и факторов [3].

АНАЛИЗ ЧАСТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОПЕРАТИВНОСТИ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ФУНКЦИЙ СЛУЧАЙНОГО АРГУМЕНТА

Из теории полета КА известно, что если, например, в данный момент обслуживаемый объект только что «прошел» зону видимости контролирующей станции, то следующий его «выход» в зону видимости будет осуществлен только через интервал времени

$$\Delta t = f_1(t_{\text{пр}}),$$

где f_1 – функция, задаваемая технологическим циклом управления;
 $t_{\text{пр}}$ – момент получения в ситуационном центре СИО первичной информации.

Но величина $t_{\text{пр}}$ – величина случайная, в первом приближении ее можно считать равномерно распределенной на интервале планирования (например, на несколько суток вперед), следовательно, и величина $t_{\text{ио}}$ (суммарная продолжительность временных затрат на сбор информации об обслуживаемом объекте) является случайной. Тогда, в свою очередь, продолжительность времени t_p , которым располагает ЛПР, также является случайной величиной. Для расчета функции $\Delta t = f_1(t_{\text{пр}})$ используются алгоритмы теории полета КА. Зависимость $t_{\text{ио}} = f(t_{\text{пр}})$ описывается ступенчатой разрывной функцией. Для такого сложного варианта (исходная функция – разрывная, значения аргумента – дискретные) алгоритм построения функции распределения $F(t_{\text{ио}})$ может быть только численным (неаналитическим). Алгоритм в конечном итоге сводится к расчетам по формуле

$$F(t_{\text{ио}}) = \sum_i \int_{\Delta t_i} f_2(t_{\text{пр}}) dt_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где Δt_i – участки, на которых выполняется неравенство $t_{\text{ио}} \leq t_{\text{дир}}$;
 $t_{\text{дир}}$ – директивное время решения задачи информационного обеспечения;
 i – количество соответствующих участков.

Из вышеизложенного следует, что для ряда специальных ОТС случайную природу имеет и вероятность $P_{\text{дц}}$. Таким образом, для обоснования требований к параметрам СИО необходимо ввести в рассмотрение гарантированную вероятность $W = P(P_{\text{дц}} > P^{\text{доп}})$ – вероятность того, что оцениваемая структура БОПр может обеспечить решение задач ИО за заданное время с вероятностью не ниже заданной.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНТУРА БОПр МЕТОДОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИНДИКАЦИИ

Если при обосновании структуры СИО учитывать более «тонкую» интерпретацию комплекса условий функционирования ОТС, то в соответствии с концепциями системного анализа [3] при расчете даже такого частного показателя, как вероятность доведения баллистических данных (БД) необходимо учитывать случайную природу величины $\hat{t}_{\text{тр}}$. При такой постановке задачи исследования вероятность $P_{\text{дов}} = P(\hat{t}_{\text{дов}} < \hat{t}_{\text{тр}})$ также является случайной величиной, и в рассмотрение вводится стохастический индикатор w_A события (в данном случае – доведения БД до исполнительного органа). Следовательно, для оценивания апостериорной вероятности $P(P_{\text{дов}} > P_{\text{зад}})$ необходимо вычислить квантиль, соответствующий заданному уровню γ . Рассмотрим пример. Пусть планируется операция, БД для которой должны быть доведены не позднее директивного момента времени z . Параметры и ЭТХ СИО и реализуемого ею процесса прохождения сигнала позволяют завершить доставку БД к моменту времени y . Требуется рассчитать вероятность доведения управляющей информации при условии, что возможная (y) и директивная (\hat{z}) длительности процесса доведения информации для конкретной структуры СИО подчинены смещенным показательным законам.

В рассматриваемом случае средняя вероятность достижения цели процесса (доведения БД) будет определяться следующим соотношением [3]:

$$P_{\text{ДЦ}} = P(\hat{y} \leq \hat{z}) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\hat{y}}(Z) dF_{\hat{z}}(Z) = \int_0^1 w dF_{\hat{w}_1}(w) = \bar{w}_1, \quad (2)$$

где $\hat{w}_1 = F_{\hat{y}}(\hat{z})$. Пусть для гипотетической СИО $\mu = 0,5; a = 1; v = 1; c = 0,2$.

После преобразований и последующего интегрирования получим

$$\bar{w}_1 = 1 - \frac{v}{v + \mu} e^{\mu(a-c)} = 0,596. \quad (3)$$

Пусть в ВЗУ задан уровень гарантии $P(P_{\text{дов}} > P_{\text{зад}}) = \gamma = 0,9$. После подстановки исходных данных получим $w_1 = 1 - (0,9)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{1-2}{2}} = 0,424$. Следовательно, гарантируемая вероятность доведения БД составляет $\omega_1^{\Gamma} > 0,424$, и именно на это значение необходимо ориентироваться при принятии решения по структуре системы БОПр. Следует подчеркнуть, что величина μ не только характеризует качество подсистемы доведения информации, но и является одним из параметров быстродействия всего информационного контура для оцениваемого варианта структуры (станций измерений, подсистемы передачи данных, пунктов управления, центров обработки информации и т.п.). Следует заметить также, что в рамках данного примера задача параметрического синтеза заключается в обосновании требований к величине μ . Например, при $\omega_1^{\Gamma} > 0,8$ характеристика быстродействия должна быть не менее чем $\mu_{\text{тр}} = 1,45$ (СИО с данным параметром μ обеспечивает гарантируемую вероятность доведения БД не ниже 0,8).

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВХОДНЫМ ТОЧНОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНТУРА БОПр

Рассмотрим класс подвижных объектов (ПО), процесс функционирования которых складывается из трех элементов – перемещения в пространстве, изменения состояния их бортовых приборов и осуществления обмена с окружающей средой (информацией, веществом или энергией). Вследствие влияния случайных факторов успех единичного акта взаимодействия l -го ПО с j -го объектом должен характеризоваться некоторой вероятностью ν_{lj} . Кроме того, очевидно, каждому способу взаимодействия пары « l - j » соответствует свое значение t_{lj}^* продолжительности взаимодействия. Для указанных типов ПО возможны два основных варианта: целераспределение, обеспечивающее минимум продолжительности t_{Σ} всей операции обслуживания; целераспределение, обеспечивающее максимум вероятности $P_{N_{\text{тр}}}$ достижения эффекта, под которым подразумевается обслуживание числа целей не менее заданного: $P_{N_{\text{тр}}} = P(n_{\text{обсл}} \geq N_{\text{тр}})$. Задачи отыскания планов назначений, соответствующие перечисленным вариантам целераспределений, далее будем сокращенно называть следующим образом – ЗЦР-I и ЗЦР-II, а результаты их решения (планы назначений) будем обозначать \tilde{X}^I и \tilde{X}^{II} соответственно. Исходной информацией для вычисления ПЭ являются элементы двух матриц – $\|V_{lj}\|$ и $\|t_{lj}\|$. Очевидно, как на этапе проектирования, так и на этапе планирования применения ОТС и тем более в ходе управления применением большая часть исходных данных, необходимых для вычисления $P_{\text{ДЦ}}$, будет либо известна приближенно, с ошибками, либо будет указываться в некотором диапазоне. Сами оптимальные планы \tilde{X}^I , \tilde{X}^{II} на практике также

определяются с некоторыми вычислительными ошибками, обусловленными погрешностями численных алгоритмов, а также сбоями ЭВМ. Таким образом, объективно возникает задача учета ошибок в исходной информации при организации информационного контура БОПр.

Учет ошибок исходных данных при вычислении t_{Σ}^{\min} в случае реализации ЗЦР-1.

В известной литературе описаны только «машинные» методы решения ЗЦР-1 (метод «запрещенных» клеток, разгрузочных цепей и т.д.). В данном случае для получения выражения, связывающего t_{Σ}^{\min} и Δt_{lj} , нам необходимо иметь каноническое представление ЗЦР-1 как задачи линейного программирования. Можно показать, что при формулировании ЗЦР-1 как классической задачи линейного программирования целевая функция может быть записана следующим образом:

$$F_{II} = \sum_{j=1}^D c_j \cdot z_j, \quad (4)$$

где $D = N^2 + N + 1$; $c_1 = c_2 = \dots = c_{N^2} = 0$; $c_{N^2+2} = \dots = c_D = 0$.

В формуле (4) введены следующие обозначения:

z_1, \dots, z_{N^2} – искомые переменные задачи линейного программирования, совпадающие с оптимальным планом \tilde{X}^I [оператор перехода для индексов имеет вид $j = ((l-1)N + K)$];

$z_{N^2+1} = t$; z_{N^2+2} – вспомогательные переменные, вводимые в рассмотрение дополнительно с целью представления системы ограничений задачи линейного программирования в виде равенства. Напомним, что требуется найти максимум $F_{II} = -F = -t_{\Sigma}$. После алгебраических преобразований и учета особенностей решения задачи о назначениях получим

$$\Delta t_{\Sigma}^{\min} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Delta t_{lk}. \quad (5)$$

Таким образом, не решая ЗЦР-1 как задачу линейного программирования, мы получаем выражение для оценивания чувствительности решения ЗЦР-1 к ошибкам исходных данных. Это выражение может быть использовано и при оценке целесообразности применения оптимального целераспределения. Например, пусть известно, что ошибка вычисления минимальной положительной продолжительности обслуживания равна величине t_{Σ}^{\min} , т.е. $t_{\Sigma}^{\min} = t_{\Sigma(0)}^{\min} \pm t_{\Sigma}^{\min}$. Пусть при этом выигрыш от оптимизации плана назначений равен величине $V_1 = t_{lj}^{\max} - t_{\Sigma(0)}^{\min}$. Тогда при $t_{\Sigma}^{\max} - t_{\Sigma}^{\min} = \Delta t_{\Sigma}^{\min} > V_1$ оптимизация нецелесообразна вследствие неудовлетворительной достоверности исходной информации. Например, при $\Delta t_{lj} = 1$ мин (для всех l и k) в случае $N = 20$ имеем $\Delta t_{\Sigma}^{\min} = 6,6$ ч. Следовательно, реализация ЗЦР-1 будет целесообразна, если выигрыш от оптимизации равен 7 ч и более.

Кроме того, выражение (5) может использоваться для решения обратной задачи по обоснованию требований к точности расчета продолжительности единичного взаимодействия

$$t_{lj} : \Delta t_{lj}^{\text{доп}} = \frac{(\Delta t_{\Sigma}^{\min})_{\text{доп}}}{N^2}.$$

Очевидно, что с ростом размерности группировки целей эти требования резко возрастают: при $N = 20$ и $\Delta t_{\Sigma}^{\min} = 3,3$ ч величины t_{lj} должны вычисляться с точностью до 30 с, а при $N = 40$ – с точностью до ≈ 7 с, хотя при $N = 6$ $\Delta t_{\Sigma}^{\min} \approx 6$, а при $N = 3$ $\Delta t_{\Sigma}^{\min} \approx 24$.

Учет ошибок исходных данных при вычислении $P_{N_{\text{тр}}}$ в случае реализации ЗЦР-II. Можно показать, что имеет место следующее соотношение:

$$\Delta F_{\text{III}} = \sum_{j=1}^{N^2} Z_j \Delta c_j,$$

где $F_{\text{II}} = M_{n_n}$ – решение ЗЦР-II как классической задачи линейного программирования, $j = 1(1)N^2$, $\Delta c_j = \Delta v_{ij}$, $(j-1)N + l$. Тогда с учетом линейной связи P_N и M_{n_n} , P_N и v_{lk} , после алгебраических преобразований получим [1]

$$\Delta P_{N_{\text{тр}}}^{\max} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N v_{lk} \Delta v_{lk}. \quad (6)$$

Данное выражение может использоваться и для оценивания целесообразности реализации ЗЦР-II, и для обоснования требований к точности вычисления вероятности обслуживания цели. Заметим, что требования к точности вычисления величин v_{lk} весьма жестки: ошибка

$$\Delta v_{ij} \text{ не должна превышать значение } \left(\Delta v_{ij}^{\text{доп}} \right)_{\max} = \frac{1}{N^2}.$$

Рассмотрим пример анализа влияния характеристик СИО на эффективность целевого применения ПО. Зависимость вероятности успешного взаимодействия двух ПО от точности определения координат цели в первом приближении описывается формулой $P = 1 - e^{-\frac{R^2}{\sigma^2}}$, где σ – СКО определения координат цели, рассчитываемое по результатам измерений. Обозначим через $\Delta\sigma$ статистическую ошибку определения величины σ (определяется как функция числа измерений и заданного уровня доверительной вероятности). В соответствии с теорией чувствительности [3] $\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \sigma} \Delta\sigma$. В свою очередь, совокупность величин ΔP_j определяет суммарную ошибку $\Delta P_{N_{\text{тр}}}^{\max}$ расчета вероятности выполнения целевой задачи.

После алгебраических преобразований получаем $\frac{\partial P}{\partial \sigma} = \frac{2R^2}{\sigma^3} \left(-e^{-\frac{R^2}{\sigma^2}} \right)$. Обозначим через $\Delta_{\text{ЗЦР}}$

выигрыш от «оптимизации по вероятности». Очевидно, что при $\Delta_{\text{ЗЦР}} < \Delta P$ решение оптимизационной задачи бессмысленно, и при определении плана назначений достаточно использовать некоторый другой вариант, удовлетворяющий «физическим ограничениям».

Влияние характеристик точности определения компонент скорости цели оценивается по более громоздкой схеме, так как не существует аналитического выражения, связывающего СКО определения скорости с ошибкой определения расчетного времени старта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обоснования рационального варианта структуры СИО ОТС, в соответствии с принципами системного подхода, необходимо учитывать случайную природу факторов различных иерархических уровней. В статье предложены два подхода к обоснованию требований к параметрам информационного контура, обеспечивающие гарантированное выполнение задачи информационного обеспечения ОТС за заданное время с заданной вероятностью. Полученные выражения можно использовать при обосновании требований к точности расчета времени старта, при оценивании влияния точностных характеристик СККП на эффективность БОПр, при обосновании требуемой дискретности решения ЗЦР, при исследовании влияния точностных характеристик на эффективность операций транспортно-технического обслуживания орбитальных целей и т.п. Степень детализации разработанных методик определяется точностью прогноза условий обстановки, в которых будет осуществляться применение ОТС.

Список используемых источников

1. *Остапенко О.Н., Баушев С.В., Морозов И.В.* Информационно-космическое обеспечение группировок войск (сил) ВС РФ. – СПб.: Любавич, 2012. – 386 с.
2. *Волков В.Ф.* Применение космических средств при обеспечении боевых действий в зоне Персидского залива: учеб. пособие. – СПб.: МО РФ, 1994. – 50 с.
3. *Никитин С.В., Сидоров В.Н.* Методика оценивания влияния характеристик математического обеспечения на эффективность функционирования вычислительных средств // Известия вузов. Приборостроение. – 1983. – № 6. – С.43–48.
4. *Волков В.Ф., Толмачев А.А.* Методика определения гарантированной вероятности выполнения задачи информационного обеспечения процесса обслуживания вновь выводимых объектов // Радиопромышленность. – 2015. – № 1(1). – С.127–137.

Р.В. Волков,
кандидат техн. наук, доцент;
С.Р. Малышев,
кандидат техн. наук, доцент;
В.В. Севидов;
А.Н. Симонов,
кандидат техн. наук, доцент

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАНОНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ ПО РАДИОСИГНАЛАМ ОПОРНЫХ РЕПЕРНЫХ СТАНЦИЙ

Отмечена основополагающая предпосылка разрабатываемой системы определения местоположения земных станций. Обоснована актуальность определения канонических параметров спутников-ретрансляторов в интересах создания такой системы. Представлена структурная схема и раскрыты алгоритмы определения координат и параметров движения спутников-ретрансляторов по сигналам опорных реперных станций. Обозначено направление дальнейшего исследования.

Ключевые слова: комплекс радиомониторинга, спутник-ретранслятор, опорная реперная станция, канонические параметры, определение местоположения, суммарно-дальномерный способ, итерационный алгоритм, ряд Тейлора, разностно-доплеровские измерения.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы отмечается возросший интерес ряда отечественных ведущих научно-производственных и учебных организаций [1] к созданию системы определения местоположения (ОМП) земных станций (ЗС) по радиосигналам, принятым комплексом радиомониторинга (КРМ) от спутников-ретрансляторов (СР).

Основополагающей предпосылкой разрабатываемой системы является наличие помимо «основного» СР, через который организуется канал связи, «смежного» СР, способного ретранслировать те же самые радиоизлучения что и «основной», но с большим ослаблением и другой частотой переноса [2]. Основной и смежный СР используются в качестве опорных точек, относительно которых осуществляется ОМП ЗС. Данный факт создает предпосылки для появления требований к точности определения координат основного и смежного СР [3].

Для прогнозирования координат СР на различные интервалы времени с помощью систем дифференциальных уравнений помимо координат СР в начальный момент времени необходимо знание параметров его вектора скорости [4]. Кроме того, параметры векторов скоростей основного и смежных СР необходимы при определении параметров движения летательного аппарата системой геолокации по излучениям находящейся на его борту станции спутниковой связи [5]. В совокупности координаты СР и параметры его вектора скорости называются каноническими параметрами СР.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАНОНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ

Структурная схема системы определения канонических параметров СР S комплексом радиомониторинга K по сигналам опорных реперных станций (ОРС) P_i ($i = 1 \dots 4$) представлена на рис. 1. В КРМ возможна реализация функций одной из ОРС по варианту, представленному на рис. 1 – первой ОРС.

На рис. 1 введены следующие обозначения: Θ_i – угол между вектором скорости СР \vec{V}_S и направлением на i -ю ОРС, \dot{R}_i – радиальная скорость СР в направлении на i -й измеритель, $i = 1 \dots 4$. Предполагается, что координаты ОРС x_i, y_i, z_i ($i = 1 \dots 4$) и координаты КРМ x_K, y_K, z_K известны.

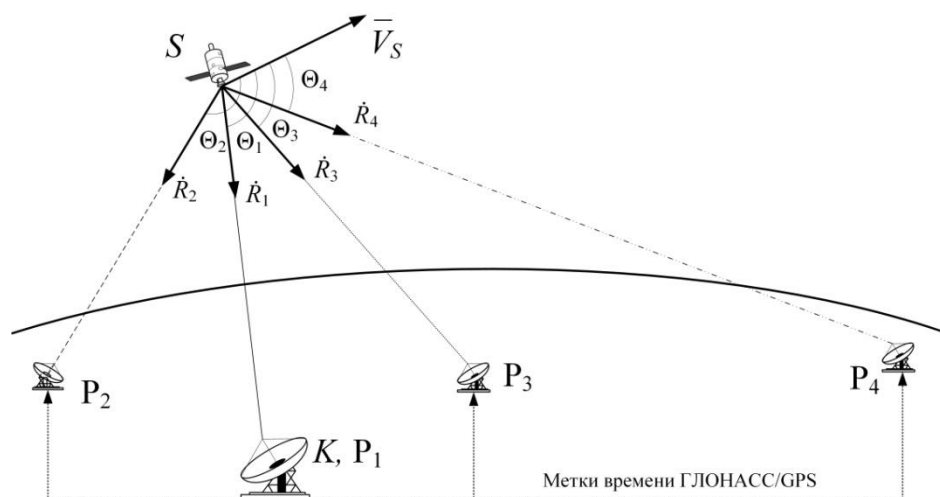


Рис. 1. Структурная схема определения канонических параметров спутников-ретрансляторов

Синхронизация излучений ОРС реализуется с помощью меток времени спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и (или) GPS.

РАСЧЕТ КООРДИНАТ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СУММАРНО-ДАЛЬНОМЕРНОГО СПОСОБА

Для расчета координат СР используется суммарно-дальномерный способ (СДС) на основе сигналов как минимум трех ОРС P_1, P_2 и P_3 .

В КРМ измеряются времена прохождения t_1, t_2 и t_3 радиосигналами траекторий P_1SK, P_2SK и P_3SK . Умножением измеренных времен на скорость света c получают длины соответствующих траекторий d_i , где $i=1 \dots 3$, т.е.

$$d'_i = t_i c. \quad (1)$$

Полученные величины d'_i являются координатно-информативными параметрами СР, а поверхностями положения будут эллипсоиды вращения. Первый фокус всех трех эллипсоидов совпадает с точкой K , вторые фокусы каждого эллипсоида располагаются в точках P_1, P_2 и P_3 соответственно [6].

Неоднозначность, обусловленная использованием трех, а не четырех поверхностей положения и выраженная появлением аномальной точки S' , устраняется априорным знанием координат СР с большой погрешностью, полученных с использованием данных формата TLE либо другим способом.

Итерационный алгоритм расчета координат СР включает следующие этапы.

Этап 1. Осуществляется выбор координат опорной точки x_0, y_0, z_0 . Целесообразно выбирать эту точку как можно ближе к реальному положению СР.

Этап 2. Производится расчет длин траекторий P_1SK, P_2SK и P_3SK $d_{i,0}$, где $i = 1 \dots 3$ при условии равенства координат СР S координатам опорной точки x_0, y_0, z_0 по формуле

$$d_{i,0} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} + \sqrt{(x_K - x_0)^2 + (y_K - y_0)^2 + (z_K - z_0)^2}. \quad (2)$$

Здесь x_K, y_K, z_K – координаты КРМ;

x_i, y_i, z_i , – координаты ОРС P_i , где $i = 1 \dots 3$.

Этап 3. Выполняется расчет невязок s_1, s_2 и s_3 , т.е. несоответствие между рассчитанными на втором этапе $d_{i,0}$ (2) и координатно-информативными параметрами d'_i (1), где $i = 1 \dots 3$:

$$s_1 = d'_1 - d_{1,0}, \quad s_2 = d'_2 - d_{2,0}, \quad s_3 = d'_3 - d_{3,0}.$$

Этап 4. При разложении в ряд Тейлора функций $d_{1,0}, d_{2,0}$ и $d_{3,0}$, используя первые члены, формируется система линейных уравнений, где в качестве переменных выступают поправки к координатам $\Delta x_S, \Delta y_S, \Delta z_S$. Тогда

$$\begin{cases} \frac{\partial d_{1,0}}{\partial x} \Delta x_S + \frac{\partial d_{1,0}}{\partial y} \Delta y_S + \frac{\partial d_{1,0}}{\partial z} \Delta z_S = s_1, \\ \frac{\partial d_{2,0}}{\partial x} \Delta x_S + \frac{\partial d_{2,0}}{\partial y} \Delta y_S + \frac{\partial d_{2,0}}{\partial z} \Delta z_S = s_2, \\ \frac{\partial d_{3,0}}{\partial x} \Delta x_S + \frac{\partial d_{3,0}}{\partial y} \Delta y_S + \frac{\partial d_{3,0}}{\partial z} \Delta z_S = s_3, \end{cases} \quad (3)$$

где частные для $i = 1 \dots 3$ производные рассчитываются согласно выражениям:

$$\frac{\partial d_{i,0}}{\partial x} = \frac{x_i - x_0}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} + \frac{x_K - x_0}{\sqrt{(x_K - x_0)^2 + (y_K - y_0)^2 + (z_K - z_0)^2}},$$

$$\frac{\partial d_{i,0}}{\partial y} = \frac{y_i - y_0}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} + \frac{y_K - y_0}{\sqrt{(x_K - x_0)^2 + (y_K - y_0)^2 + (z_K - z_0)^2}},$$

$$\frac{\partial d_{i,0}}{\partial z} = \frac{z_i - z_0}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} + \frac{z_K - z_0}{\sqrt{(x_K - x_0)^2 + (y_K - y_0)^2 + (z_K - z_0)^2}}.$$

Этап 5. После решения системы уравнений (3) получают координаты новой опорной точки x_1, y_1, z_1 :

$$x_1 = x_0 + \Delta x_S, \quad y_1 = y_0 + \Delta y_S, \quad z_1 = z_0 + \Delta z_S.$$

Этапы 2–5 в совокупности составляют первую итерацию. Далее итерации повторяют, используя каждый раз новую опорную точку, полученную на предыдущем шаге. Количество необходимых итераций зависит от корректности выбора координат начальной опорной точки (этап 1) и требуемой точности определения координат СР. С точностью связан шаг итерации d_n , определяемый как расстояние между текущими и предыдущими координатами опорной точки и сравниваемый с порогом. Необходимое число итераций, как правило, не превышает четырех.

При завершении итераций в качестве координат СР x_S, y_S и z_S выбирают значения координат опорной точки на последнем шаге, которые являются выходными результатами представленного алгоритма.

ВЫВОД АНАЛИТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА СКОРОСТИ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ

Для одномоментного определения вектора скорости СР \bar{V}_S на основе разностно-доплеровских измерений необходимо минимум четыре ОРС. Предполагается, что координаты СР x_S, y_S, z_S уже рассчитаны с помощью алгоритма, представленного выше.

Зависимость излучаемой i -й ОРС частоты f_{P_i} и принимаемой в K частоты f_i ($i=1 \dots 4$) того же радиосигнала имеет вид [7]

$$f_i = f_{P_i} + f_{P_{ni}} + f_{D_i} + f_G + f_{Gn} + f_{D_{Ki}},$$

- где $f_{P_{ni}}$ – нестабильность генератора частот ОРС (данная величина составляет 10^{-10} Гц для рубидиевых генераторов и в дальнейших расчетах не учитывается);
 f_{D_i} – доплеровский сдвиг частоты на входе СР, за счет его сближения (удаления) с (от) i -й ОРС;
 f_G – частота переноса (частота "подставки" СР);
 f_{Gn} – нестабильность генератора частот СР;
 $f_{D_{Ki}}$ – доплеровский сдвиг частоты на выходе СР за счет его сближения (удаления) с (от) K .

Влияние других эффектов на изменение частоты в рамках рассматриваемой задачи пренебрежимо мало и поэтому не учитывается.

При допущении $f_{P_1} \approx f_{P_2} \approx f_{P_3} \approx f_{P_4}$ справедливо равенство

$$f_{D_{K1}} = f_{D_{K2}} = f_{D_{K3}} = f_{D_{K4}} = f_{D_1}.$$

Доплеровский сдвиг частоты f_{D_i} без учета релятивистского эффекта рассчитывается как

$$f_{D_i} = f_{P_i} \frac{\dot{R}_i}{c} = f_{P_i} \frac{|\bar{V}_S| \cos \Theta_i}{c}. \quad (4)$$

Отсутствие информации о нестабильности генератора частот СР приводит к необходимости применения разностно-доплеровских измерений. Разности доплеровских сдвигов частот f_{12} , f_{13} и f_{14} радиосигналов ОРС P_2 , P_3 , P_4 в КРМ относительно радиосигнала ОРС P_1 можно представить в виде:

$$\begin{aligned} f_{12} &= f_1 - f_2 = f_{P_1} + f_{D_1} - f_{P_2} - f_{D_2}, \\ f_{13} &= f_1 - f_3 = f_{P_1} + f_{D_1} - f_{P_3} - f_{D_3}, \\ f_{14} &= f_1 - f_4 = f_{P_1} + f_{D_1} - f_{P_4} - f_{D_4}. \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно теореме о скалярном произведении векторов [7] справедливо, что

$$\cos \Theta_i = \frac{(x_i - x_S)\dot{x}_S + (y_i - y_S)\dot{y}_S + (z_i - z_S)\dot{z}_S}{\sqrt{(x_i - x_S)^2 + (y_i - y_S)^2 + (z_i - z_S)^2} \sqrt{\dot{x}_S^2 + \dot{y}_S^2 + \dot{z}_S^2}}. \quad (6)$$

Модуль вектора скорости СР

$$|\bar{V}_S| = \sqrt{\dot{x}_S^2 + \dot{y}_S^2 + \dot{z}_S^2}, \quad (7)$$

а расстояние от i -й ОРС до СР d_{P_iS} рассчитывается по формуле

$$d_{P_iS} = \sqrt{(x_i - x_S)^2 + (y_i - y_S)^2 + (z_i - z_S)^2}.$$

Выражения (5) с учетом выражений (4), (6) и (7) преобразуются в систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_S A_1 + \dot{y}_S B_1 + \dot{z}_S C_1 = D_1, \\ \dot{x}_S A_2 + \dot{y}_S B_2 + \dot{z}_S C_2 = D_2, \\ \dot{x}_S A_3 + \dot{y}_S B_3 + \dot{z}_S C_3 = D_3, \end{cases} \quad (8)$$

где коэффициенты при переменных \dot{x}_S , \dot{y}_S , \dot{z}_S и свободные члены определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{f_{P_1}(x_1 - x_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_2}(x_2 - x_S)}{cd_{P_2S}}, & A_2 &= \frac{f_{P_1}(x_1 - x_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_3}(x_3 - x_S)}{cd_{P_3S}}, \\ A_3 &= \frac{f_{P_1}(x_1 - x_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_4}(x_4 - x_S)}{cd_{P_4S}}, & B_1 &= \frac{f_{P_1}(y_1 - y_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_2}(y_2 - y_S)}{cd_{P_2S}}, \end{aligned}$$

$$B_2 = \frac{f_{P_1}(y_1 - y_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_3}(y_3 - y_S)}{cd_{P_3S}}, \quad B_3 = \frac{f_{P_1}(y_1 - y_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_4}(y_4 - y_S)}{cd_{P_4S}},$$

$$C_1 = \frac{f_{P_1}(z_1 - z_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_2}(z_2 - z_S)}{cd_{P_2S}}, \quad C_2 = \frac{f_{P_1}(z_1 - z_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_3}(z_3 - z_S)}{cd_{P_3S}},$$

$$C_3 = \frac{f_{P_1}(z_1 - z_S)}{cd_{P_1S}} - \frac{f_{P_4}(z_4 - z_S)}{cd_{P_4S}}, \quad D_1 = f_{12} - f_{P_1} + f_{P_2}, \quad D_2 = f_{13} - f_{P_1} + f_{P_3}, \quad D_3 = f_{14} - f_{P_1} + f_{P_4}.$$

Система уравнений (8) решается, например, методом Крамера [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью представленных алгоритмов разработана модель движения искусственного спутника Земли [8], реализующая одномоментное определение канонических параметров СР на основе суммарно-дальномерных и разностно-доплеровских измерений четырех ОРС.

Полученные алгоритмы и математический аппарат могут быть использованы при проектировании и исследовании комплексов радиомониторинга, а также в учебном процессе. Данная статья не исчерпывает рассматриваемую тему. Дальнейшему исследованию подлежат точностные характеристики системы определения канонических параметров СР по радиосигналам ОРС.

Список используемых источников

1. Волков Р.В., Севидов В.В., Чемаров А.О. Точность геолокации разностно-дальномерным методом с использованием спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2014. – №9. – С. 12–19.
2. Haworth D.P., Smith N.G., Bardelli R., Clement T. Interference localization for Eutelsat satellites – the first European transmitter location system // International Journal of satellite communications. – 1997. – Vol.15. – P. 155–183.
3. Севидов В.В., Чемаров А.О. Определение координат спутников-ретрансляторов в алгоритме разностно-дальномерного метода геолокации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2015. – №3. – С. 41–47.
4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ в ФИПС (Роспатент) № 2015661288. Определение координат и параметров движения источника радиоизлучения на основе разностно-временных и разностно-доплеровских измерений / Севидов В.В. – Оpubл. 20.11.2015, Бюл. № 11.
5. Определение параметров движения летательного аппарата системой геолокации по излучениям находящейся на его борту станции спутниковой связи / Р.В. Волков, А.Х. Кельян, В.В. Севидов, А.О. Чемаров // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – №5. – С. 5–9.
6. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Астрель АСТ, 2002. – 992 с.
7. Волков Р.В., Севидов В.В., Теслевич С.Ф. Математическая модель радиосигнала, принятого комплексом радиомониторинга от спутника-ретранслятора // Научные технологии. – 2015. – №12. – С. 44–49.
8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ в ФИПС (Роспатент) №2016611148. Модель движения искусственного спутника Земли / Волков Р.В., Саяпин В.Н., Севидов В.В. – Оpubл. 27.01.2016, Бюл. № 1.

И.Г. Голованских,
кандидат военных наук, доцент;
С.А. Матвеев
ГИКЦ имени Г.С. Титова;
А.М. Петухов,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЕРЕБАЗИРУЕМЫХ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ ДИНАМИЧНО РАЗВИВАЮЩИХСЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрен алгоритм методики баллистического обоснования размещения перебазируемых командно-измерительных систем (КИС) как основы методики обоснования предложений по выбору районов их размещения, и дана краткая характеристика его этапов.

Ключевые слова: космическая система, дистанционное зондирование Земли, командно-измерительные системы.

Существующие в настоящее время космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и наблюдения находят активное применение в различных системах мониторинга земной поверхности. Вопросы осуществления мониторинга земной поверхности как одной из составляющей космической деятельности регулируются в том числе и международными соглашениями, подписанными Россией и ранее СССР [1]. В связи с этим во многих отраслях жизнедеятельности системы мониторинга являются составной частью международных систем, что вызвано глобальным характером их возможностей. Во многих регионах мира финансируются до нескольких десятков программ ДЗЗ [2]. Поэтому эволюционируют требования к качеству решаемых КА ДЗЗ целевых задач, срокам их выполнения. Наряду с требованиями к разрешающей способности, низкому энергопотреблению, большому ресурсу космических средств, к космическим системам (КС) ДЗЗ и наблюдения формируется такое требование, как возможность наблюдения динамично развивающихся чрезвычайных ситуаций (ЧС). Зачастую обстановка в районах ЧС динамично изменяется, что сопровождается значимым смещением эпицентра ЧС (ЭЧС) относительно его начального положения. Данное обстоятельство обуславливает актуальность съемки смещающегося ЭЧС, который вместе с тем находился бы в полосе обзора КА ДЗЗ на момент его пролета.

Для реализации возможности наблюдения динамично развивающихся ЧС не обязательно изменять состав бортовой аппаратуры. В настоящее время управление ОГ КА ДЗЗ осуществляется с ограниченного количества территориально распределенных стационарных пунктов управления. В силу специфики процесса управления КА ДЗЗ интервал времени от момента получения координат эпицентра динамически развивающейся ЧС до ее наблюдения КА ДЗЗ (T_0) может составлять несколько часов. За указанный промежуток времени ситуация в районе ЧС может кардинально измениться, и полученный в данных условиях обстановки снимок района будет отражать далеко не самую критичную его область.

Следовательно, наблюдение динамично развивающихся ЧС является актуальной задачей мониторинга ЧС, а ее реализация возможна размещением пунктов управления (ПУ) вблизи трассы КА ДЗЗ до момента пересечения ею района ЧС. Для такого решения рассмотренной

задачи, безусловно, необходимо использование в составе КС ДЗЗ перебазируемых средств управления КА. При этом необходимо на базе научно обоснованных доводов определить районы их расположения. В связи с приведенными доводами для определения возможных районов расположения перебазируемых средств актуальной является разработка специальной методики. В ее основе лежит методика баллистического обоснования размещения перебазируемых командно-измерительных систем (КИС).

Структура алгоритма методики. Основное влияние на процесс выполнения задач наблюдения ЭЧС КС ДЗЗ, размещение перебазируемой КИС оказывает на этапах до съемки ЭЧС, поэтому при разработке методики были учтены только следующие этапы:

1. Получение и передача потребителем координат ЭЧС и размеров района ЧС.
2. Формирование потребителем заявки в ЦУС на съемку заданного района.
3. Разработка ЦУС рабочей программы (РП) и соответствующей заявки на выполнение целевых задач и передача их в ЦУП.
4. Определение программы сеанса управления (СУ) и времени его проведения для передачи РП на борт КА, передача этих данных из ЦУП в пункт управления КА.
5. Подготовка к СУ.
6. Передача пунктом управления РП на борт КА.
7. Движение КА по орбите от точки закладки РП до точки ее выполнения.
8. Выполнение КА ДЗЗ рабочей программы – съемки ЭЧС.

Содержание методики баллистического обоснования размещения перебазируемых КИС определяется целью ее использования – определения области на поверхности Земли, при расположении в пределах которой перебазируемая КИС способна провести закладку на борт каждого используемого КА ДЗЗ рабочей программы по съемке ЭЧС при условии попадания ЭЧС в полосу захвата КА. В состав алгоритма методики включено решение ряда задач (рис.1). Перечислим эти задачи:

1. Расчет трасс КА ДЗЗ. Создание массивов трасс для каждого КА на интервал времени, равный периоду замыкания трассы.
2. Вычисление интервалов ЗРВ стационарных КИС с привязкой по времени к периоду замыкания трассы КА. Формирование массивов ЗРВ КИС для каждого КА ДЗЗ.
3. Определение для всех КА ДЗЗ длительностей этапа 7 для структуры НКУ, не включающего перебазируемые КИС ($T_{[7]ст}$). На их основании производится расчет длительностей подготовительного периода для каждого КА ($T_{о ст}$).
4. Вычисление максимальной длительности подготовительного этапа ($T_{о max}$) для каждого КА ДЗЗ, с использованием прогноза скорости движения ЭЧС ($V_о$) и размеров участка съемки (d), а также ширины полосы захвата КА ($L_{КА}$).
5. Определение целесообразности использования перебазируемой КИС сравнением значений длительностей подготовительного этапа ($T_{о ст}$) с его максимальной длительностью ($T_{о max}$). В том случае, если $T_{о ст} \leq T_{о max}$, то в использовании перебазируемой КИС для закладки РП на борт данного КА ДЗЗ нет необходимости и дальнейшие расчеты для данного КА не нужны. А если $T_{о ст} > T_{о max}$, то использование для закладки РП на борт данного КА ДЗЗ только стационарных КИС не позволит в отведенные временные рамки выполнить задачи наблюдения ЭЧС, движущихся с прогнозируемой скоростью ($V_о$). Следовательно, во втором случае необходимо проводить дальнейшие расчеты и выбирать районы размещения перебазируемых КИС.
6. Вычисление для каждого КА ДЗЗ на основании рассчитанных максимальных длительностей подготовительного периода ($T_{о max}$) максимальной длительности этапа движения КА от момента закладки РП до съемки ЭЧС ($T_{[7] max}$).
7. Определение районов прохождения трасс КА ДЗЗ от района ЧС до условной границы, определяемой суммарной длительностью этапа проведения сеанса управления КА ($T_{[6]}$) и максимальной длительности этапа движения КА от момента закладки РП до съемки ЭЧС ($T_{[7] max}$), которую назовем интервалом удаленности (T_y).

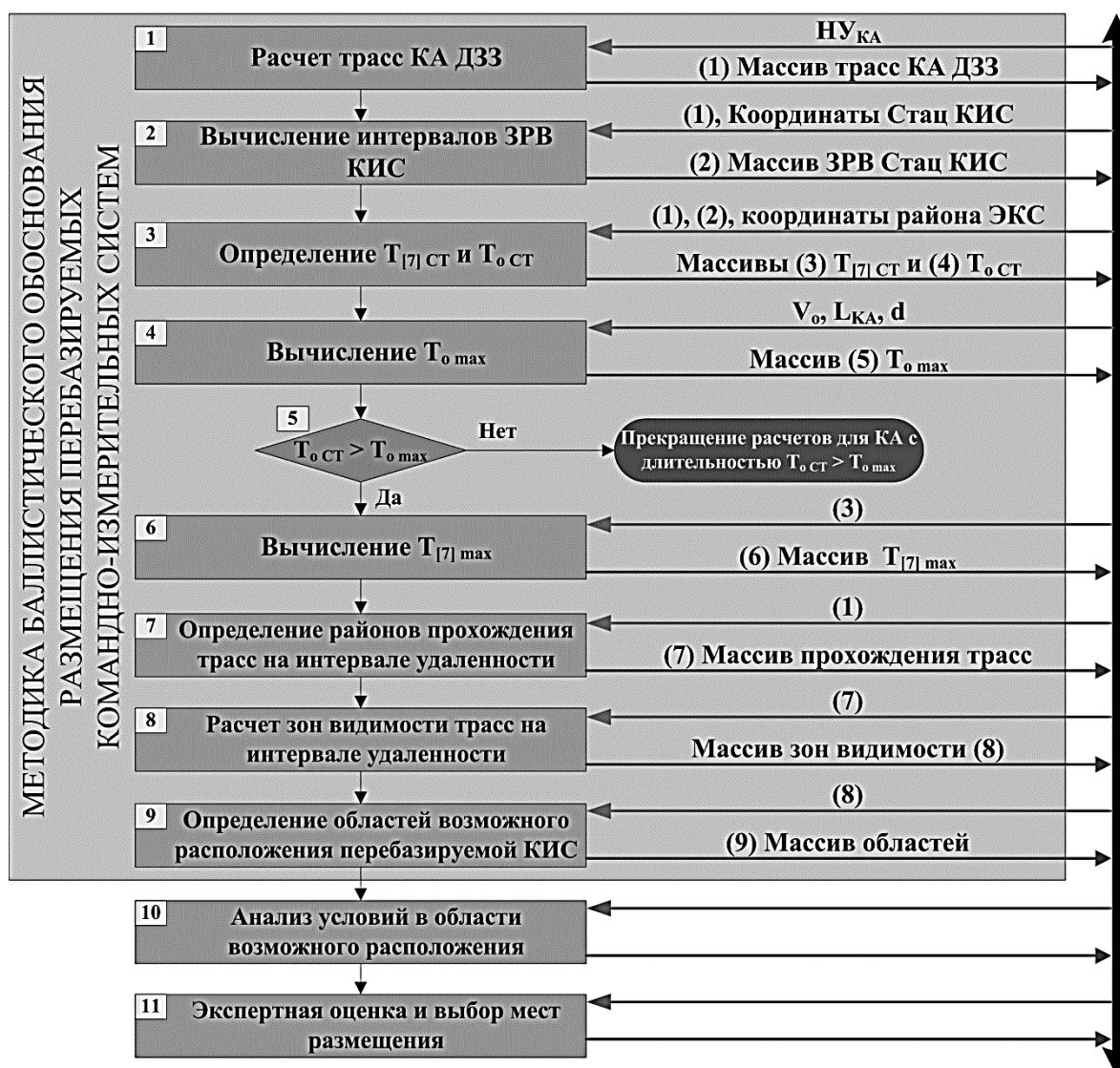


Рис. 1. Схема алгоритма методики баллистического обоснования размещения перебазируемых КИС в общей структуре методики обоснования предложений по выбору районов их размещения

8. Проведение расчета зон видимости участков трассы на интервале удаленности таким образом, чтобы длительность нахождения в ЗРВ перебазируемой КИС, расположенной в зоне видимости, была не менее длительности проведения СУ.

9. Определение для всей совокупности полученных зон видимости области на поверхности Земли, при расположении в пределах которой перебазируемая КИС способна провести закладку на борт каждого используемого КА ДЗЗ рабочей программы (рис. 2).

Большинство задач, решаемых в процессе определения области размещения перебазируемых КИС, требует проведения большого объема вычислений.

Для некоторых задач необходимы использование сложнейших математических моделей и применение специального программного обеспечения. С помощью специального программного обеспечения осуществляются расчеты траекторий движения и трасс КА ДЗЗ.

Автоматизация расчетов, проводимых в соответствии с алгоритмом поиска вариантов размещения перебазируемых КИС, позволяет значительно сократить время на формирование предложений по использованию перебазируемых КИС. В целях автоматизации расчетов разработан комплект программ для персональной ЭВМ.

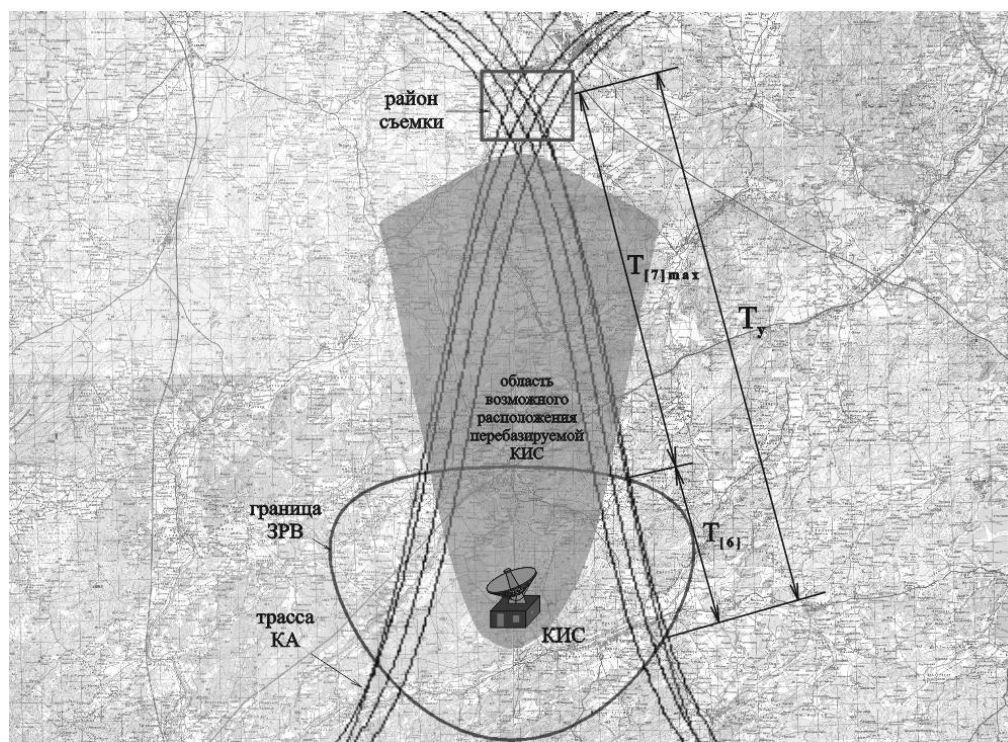


Рис. 2. Определение области возможного размещения перебазируемой КИС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Правильный обоснованный выбор районов расположения является в процессе использования перебазируемых командно-измерительных систем залогом успешного и своевременного решения космическими системами ДЗЗ задач наблюдения динамичных чрезвычайных ситуаций. В связи с этим разработка методики обоснования предложений по размещению перебазируемых КИС явилась своевременным и востребованным шагом на пути повышения возможностей наблюдения КС ДЗЗ без какой-либо модернизации дорогостоящей бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Алгоритм методики предполагает проведение большого количества вычислений. Поэтому расчеты выполняются как с использованием специального программного обеспечения (баллистического), так и разработанного в соответствии с алгоритмом методики программного обеспечения.

Список используемых источников

1. Петухов А.М., Голованских И.Г., Харченко А.В. Проблемы применения космических аппаратов научного и социально-экономического назначения в интересах ВС РФ // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 647. – С. 146 – 153.
2. Малые КА информационного обеспечения / под ред. д-ра техн. наук, засл. деятеля науки РФ, проф. В.Ф. Фатеева. – М.: Радиотехника, 2010. – 320 с.
3. Определение районов расположения перебазируемых средств управления КА / Н.Ф. Аверкиев, С.В. Васьков, И.Г. Голованских, А.М. Петухов, В.В. Салов // Указатель депонированных рукописей. Сер. А. – М.: ЦВНИ МО РФ, 2015. – Вып. № 4(129).

А.В. Глебов,
кандидат военных наук, доцент;
В.И. Горбулин,
доктор технических наук, профессор;
О.Ю. Михеев
кандидат военных наук, доцент

БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Разработана методика определения рационального состава мобильного формирования и способов использования его функциональных подразделений, которая исходя из особенностей запуска малых космических аппаратов мобильными средствами выведения, характеристик космического аппарата и ракеты-носителя позволяет осуществлять выбор на заданном (возможном) множестве районов расположения функциональных подразделений именно те районы, которые оптимально расположены по баллистическим условиям для обеспечения создания требуемой орбитальной группировки в установленные сроки.

Ключевые слова: малый космический аппарат, средства выведения, ракета-носитель, мобильные стартовые платформы, ракетно-космический комплекс, функциональное подразделение формирования по выведению спутников.

ВВЕДЕНИЕ

Вывод космического аппарата на орбиту осуществляется с помощью комплекса, состоящего из ракеты-носителя и полезной нагрузки. Ракеты-носители исходя из соображений оптимальности по энергомассовым и экономическим характеристикам, а также в зависимости от энергетических характеристик используемого ракетного топлива могут иметь две-три ступени, а их масса при старте с Земли может превосходить более чем в 100 раз массы спутников, выводимых на низкие орбиты (масса полезной нагрузки составляет около 4% стартового веса). Поэтому запуск космического аппарата является достаточно затратной операцией и для существующих в настоящее время ракет-носителей характеризуется удельной стоимостью выведения от 5 до 50 тыс. дол. США за один килограмм массы полезной нагрузки.

ПРЕИМУЩЕСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, СПОСОБСТВУЮЩИЕ РОСТУ ИХ ПОПУЛЯРНОСТИ СРЕДИ УЧАСТНИКОВ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Ведущей тенденцией развития космоса в настоящее время стало значительное увеличение числа орбитальных средств и систем, созданных в первую очередь на основе малых (маломасштабных) космических аппаратов (МКА), функционирующих в области ближнего космоса. В дальнейшем для решения различных задач в космосе и из космоса ожидается существенное увеличение относительного числа МКА при снижении доли «больших» спутников.

Применение МКА обеспечивает ряд преимуществ, а именно:

1. Незначительные временные затраты на подготовку к запуску за счет того, что основной объем испытаний, проверок и заправка МКА сжатыми газами осуществляются на заводе-изготовителе, что, в свою очередь, существенно сокращает временные нормативы подготовки и пуска ракеты космического назначения с космическим аппаратом.

2. Возможность выведения МКА на рабочие орбиты ракетами-носителями легкого класса, что, с одной стороны, значительно удешевляет общую стоимость запуска, а с другой стороны, позволяет использовать в качестве средств выведения широкий спектр имеющихся и разрабатываемых ракет-носителей различного базирования, в том числе и на мобильных наземных стартовых платформах с более короткой, в силу технологических особенностей, предстартовой подготовкой.

3. Сравнительно малые сроки разработки целевого МКА (не более трех лет от момента принятия решения на разработку данного МКА до начала летно-конструкторских испытаний).

4. Экономическая эффективность использования МКА на высотах до 1000 км, и особенно на высотах наблюдения 150–500 км, на которых срок активного существования «тяжелых» спутников (как правило, дорогостоящих) мал и их целевое применение экономически невыгодно.

5. Возможность быстрого и оперативного тиражирования целевых МКА с возможной последующей модернизацией, что позволит снизить затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и серийное изготовление и существенно расширить круг решаемых задач.

6. Возможность снижения затрат экспериментальной отработки новых различных бортовых систем и конструктивных решений.

7. Благодаря тому, что МКА обладает малым собственным гравитационным, электромагнитным и газовым фонами, удается существенно уменьшить влияние МКА на проводимые измерения.

8. Низкие стоимостные характеристики, достигаемые за счет создания единой базовой космической платформы для МКА различного назначения и сокращения расчетного срока службы (до 0,5 года).

9. Более высокие живучесть и надежность проектируемых космических систем благодаря более высокой технологической надежности как самих МКА, так и структур проектируемых на их основе систем.

Так, например, по оценкам зарубежных специалистов, затраты на изготовление «больших» спутников составляют от 88 до 220 тыс. долларов за килограмм, а срок разработки насчитывает до 5–7 лет, в то время как для МКА затраты на изготовление составляют до 17 тыс. долларов за килограмм и срок разработки достигает 2 лет.

В настоящее время из-за значительной стартовой массы ракет-носителей их пусковые установки в подавляющем большинстве являются стационарными, располагаются на космодромах в фиксированных точках Земли, что ограничивает диапазон реализуемых наклонов орбит, а зачастую ограничивает выбор трасс полета и зон падения отделяемых элементов ракет-носителей (ступеней, головного обтекателя, элементов конструкции), особенно для космодромов, расположенных внутри материка, когда трассы полета ракет-носителей проходят над населенными территориями или территориями других государств.

АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В России кроме имеющегося космодрома Плесецк для расширения возможностей по запуску своих спутников, а также пилотируемых кораблей продолжается строительство космодрома Восточный у южных границ на востоке страны. Это наиболее оптимальное расположение отечественного космодрома. Но не смотря на это, не все наклоны орбиты будут реализованы, что обусловлено проблемами с выбором безопасных трасс полета ракет-носителей и районов падения отделяемых элементов, особенно при запусках спутников на околополярные и солнечно-синхронные орбиты, используемые для наблюдения из космоса за территорией России в интересах метеорологии, исследования природных ресурсов, кон-

троля урожаев, а также освоения Арктики, обеспечения связи в больших широтах, недоступных для телекоммуникационных спутников на геостационарной орбите.

Описанные проблемы стационарных стартов решаются за счет размещения стартовых устройств со стартующими с них ракетами-носителями на мобильные наземные, морские или авиационные стартовые платформы.

Для запуска космических аппаратов используются мобильные морские и авиационные стартовые платформы.

В рамках международного проекта «Морской старт» с 1999 года осуществляются запуски космических аппаратов с морской стартовой платформы, способной транспортировать ракету-носитель со спутником в выбранную точку Мирового океана и обеспечить запуск космических аппаратов по оптимальным и безопасным трассам с безопасными районами падения в акватории Мирового океана.

Американская компания Orbital Sciences Corp. (OSC) при поддержке Агентства по перспективным оборонным исследованиям DARPA с 1990 года запускает спутники с помощью различных модификаций ракеты-носителя «Пегас» с авиационной стартовой платформы, в качестве которой используются самолеты B-52G, L-1011-100. Самая тяжелая реализованная модификация ракеты-носителя «Пегас» (Pegasus) выводит на низкие околоземные орбиты легкие космические аппараты массой до 500 кг.

В российском проекте «МАКС», а также в украинском проекте «Свитязь» используется самолет-носитель Ан-225 «Мрия» большой грузоподъемности: 250–275 т. Это позволяет за счет использования при выведении на низкую орбиту высокоэффективной трехкомпонентной одноступенчатой ракеты-носителя обеспечить в проекте «МАКС» массу выводимого груза до 18 т.

Существуют и другие перспективные по многим показателям проекты мобильных морских и авиационных стартов. Но существенными недостатками мобильных морских и авиационных стартов, в том числе и перспективных, является то, что их использование сопряжено со значительными финансовыми затратами, а на эксплуатацию огромное влияние оказывают метеорологические условия.

Решение данной задачи возможно за счет мобильных наземных стартовых платформ. В качестве основной мобильной наземной стартовой платформы уже в настоящее время можно использовать ракетно-космический комплекс (РКК) серии «Старт-1».

Ракета-носитель (РН) серии «Старт-1» – экологически чистый твердотопливный носитель, предназначенный для запуска МКА на низкие околоземные орбиты по заказам правительственных организаций и коммерческих структур при развертывании космических систем спутниковой связи, дистанционного зондирования Земли, экологического контроля и др.

Таким образом, МКА в настоящее время могут массово запускаться относительно дешевыми РН многоцелевого транспортабельного РКК серии «Старт-1» (четырехступенчатым носителем), создаваемого на конверсионной основе ракетных мобильных комплексов, снимаемых с вооружения. РКК «Старт-1» обеспечивает высокую мобильность, позволяющую действовать оперативно, производить пуски ракет вне космодромов, снижая тем самым затраты.

В данном случае РКК серии «Старт-1» (четырехступенчатый носитель) выбран в качестве одного из возможных средств выведения МКА ввиду наличия большого количества снятых с вооружения ракет с подходящими тактико-техническими характеристиками (энергетическими характеристиками, точностными показателями выведения МКА), высокой надежностью в эксплуатации и приемлемой грузоподъемностью. Это, в свою очередь, диктует необходимость разработки научно-методического аппарата в интересах обоснования состава и расположения наземных мобильных стартовых платформ в зависимости от состава и орбитальной структуры потребной орбитальной группировки МКА. В основе построения требуемой орбитальной группировки лежит идея решения задачи взаимной синхронизации процессов движения точек старта и движения подспутниковых точек МКА, приведенных к экваториальной

плоскости, при этом предусматривается возможность проведения запусков МКА как на восходящих, так и на нисходящих частях витков с целью повышения оперативности развертывания орбитальной группировки. И прежде всего необходимо решить задачу определения возможностей функционального подразделения формирования по выведению спутников, интегрально характеризующихся вероятностью выведения МКА ракетой-носителем заданного типа в расчетную ячейку целевой орбиты для фиксированных координат точки старта в центре выбранного района расположения за установленное время, что позволит разработать методику оценивания возможностей функционального подразделения формирования по выведению спутников на основе модели функционирования перспективного формирования запуска МКА.

Анализ возможностей формирования по выведению спутников позволяет решить задачи обоснования минимально необходимого количества мобильных ракетно-космических комплексов, входящих в состав данного формирования, и определить координаты их районов расположения, при этом провести оценивание их возможностей по созданию требуемой орбитальной группировки с оперативностью не ниже заданной за счет перемещений пусковых установок мобильных РКК в пределах заданных районов расположения, определяемых их реальными возможностями.

В соответствии с проведенной декомпозицией задачи исследования определены основные компоненты научно-методического аппарата, к которым относятся отдельные методики, позволяющие решать частные взаимосвязанные подзадачи.

ОЦЕНИВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПО ВЫВЕДЕНИЮ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА РАСЧЕТНЫЕ ОРБИТЫ

Рассмотрим методику оценивания возможностей функционального подразделения формирования по выведению МКА на расчетную орбиту заданным типом ракеты-носителя при фиксированной точке старта центра выбранного района расположения за определенный период исследования. Она разработана на основе математической модели функционирования перспективного формирования по выведению МКА.

Возможности функционального подразделения формирования по выведению МКА целесообразно характеризовать геометрической вероятностью $P_{\text{вывед}}$ выведения МКА ракетой-носителем заданного типа в расчетную ячейку целевой орбиты для фиксированных координат точки старта в центре выбранного района расположения за заданный период времени. Данную вероятность можно найти как отношение длины части орбиты, на которую можно вывести МКА, к общей длине орбиты, выраженной в радианах, т. е. рассчитать по формуле

$$P_{\text{вывед}} = \frac{|I_{\text{вывед}}|}{2\pi},$$

В приведенном выражении $I_{\text{вывед}}$ – интервал, т. е. множество возможных точек выведения, $I_{\text{вывед}} = \left(\bigcup_{j=1}^m I_{\text{восх } j} \right) \cup \left(\bigcup_{j=1}^m I_{\text{нисх } j} \right)$; $|I_{\text{вывед}}|$ – размер (длина) интервала выведения (при этом

$I_{\text{восх}}, I_{\text{нисх}}$ – множество интервалов выведения МКА на орбиту заданного наклона на восходящей и нисходящей частях витка соответственно за заданный период времени, $I_{\text{восх}} = [U_{\text{восх min}}; U_{\text{восх max}}]$, $I_{\text{нисх}} = [U_{\text{нисх min}}; U_{\text{нисх max}}]$; m – количество суток в течение исследуемого периода времени; j – номер суток).

Процесс развертывания орбитальной группировки заключается в том, что с пусковых

установок, расположенных в точках старта с заданными координатами широтой $\varphi_{\text{старта}}$, долготой $\lambda_{\text{старта}}$, через определенные промежутки времени последовательно проводятся запуски МКА с целью выведения их в расчетные точки пространства.

Пусть требуется вывести на заданные орбиты N космических аппаратов в соответствии с баллистической структурой $S = \{N; X\}$, имеется N ракет-носителей, каждая из которых может выводить на заданную орбиту по одному МКА.

При баллистическом обосновании стратегии оперативного развертывания орбитальной группировки требуется рассмотреть ряд частных математических задач, которые представлены ниже. Математическая постановка каждой из этих задач состоит в следующем. Пусть известны:

1) тип ракеты-носителя, который характеризуется:

- грузоподъемностью – $m_{\text{пн}}$;
- номинальной длительностью выведения – $\Delta t_{\text{вывед}}$;
- номинальной угловой дальностью выведения – $\Phi_{\text{вывед}}$;
- диапазоном угловых дальностей выведения – $\Phi_{\text{вывед min}}, \Phi_{\text{вывед max}}$;
- диапазоном длительностей выведения – $\Delta t_{\text{вывед min}}, \Delta t_{\text{вывед max}}$;

Данные параметры обеспечивают возможность вычисления границ интервала выведения $U_{\text{max}}, U_{\text{min}}$ на орбите за время выведения $T_{\text{вывед max}}, T_{\text{вывед min}}$;

2) координаты точки старта центра района расположения:

- широта – $\varphi_{\text{старта}}$,
- долгота – $\lambda_{\text{старта}}$;

3) наклонение плоскости орбиты – i и высота – $H_{\text{КА}}$.

Орбиты спутников считаются круговыми ($e = 0$) и квазиизомаршрутными:

$$n \cdot T_{\text{КА}} = m \cdot T_{\text{эф}} = T_{\text{иссл}},$$

где n – количество витков МКА;

m – количество эффективных суток, через которые происходит замыкание трассы МКА.

Предположим, что на заданную орбиту выведен первый МКА, который является базовым космическим аппаратом системы, так как определяет баллистическую структуру. На начальный момент времени t_0 он находится в восходящем узле орбиты, прямое восхождение восходящего узла которого обозначается Ω_0 . Положение точки старта M ракеты космического назначения на момент t_0 в инерциальном пространстве (в АГЭСК), заданное углом L_0 , показано на рис. 1.

Время t_0 определяется моментом пересечения Гринвичским меридианом направления на ТВР, следовательно, $L_0 = \lambda_{\text{старта}}$.

Требуется оценить возможности функционального подразделения формирования по выведению МКА за установленный интервал времени $T_{\text{иссл}}$ в заданную плоскость баллистической структуры, которая относительно базового МКА задается углом $\Delta\Omega$, т. е. рассчитать вероятность выведения $P_{\text{вывед}}$ МКА ракетой-носителем заданного типа в расчетную ячейку целевой орбиты.

Назовем основные этапы методики решения сформулированной задачи.

Из сферического треугольника MNP ($MN = 90^\circ - \varphi_{\text{старта}}$; $NP = 90^\circ - i$; $\angle NMP = A_1$) имеем:

$$\sin A_1 = \frac{\cos i}{\cos \varphi_{\text{старта}}} \Rightarrow A_1 = \arcsin \frac{\cos i}{\cos \varphi_{\text{старта}}}.$$

Аналогично рассчитывается азимут A_2 :

$$A_2 = \pi - \arcsin \frac{\cos i}{\cos \varphi_{\text{старта}}}.$$

Этап 2. Найти аргументы широты точек старта ракеты-носителя, обеспечивающие выведение МКА на орбиту заданного наклона на нисходящей и восходящей частях витка:

$$U_{\text{старта 1}} = \arcsin \frac{\sin \varphi_{\text{старта}}}{\sin i}; \quad U_{\text{старта 2}} = \pi - U_{\text{старта 1}}.$$

Этап 3. Найти моменты возможных запусков МКА в исследуемую плоскость орбиты:

$$t_{M1} = t_0 + \frac{L_{M1} - L_0}{\omega_3} = \frac{(\Omega_0 + \Delta\Omega) - L_0 + \arcsin(\operatorname{tg}\varphi_{\text{старта}} \cdot \operatorname{ctg} i)}{\omega_3} + m \cdot T_{\text{эф}}; \\ t_{M2} = t_0 + \frac{L_{M2} - L_0}{\omega_3} = \frac{(\Omega_0 + \Delta\Omega + \pi) - L_0 - \arcsin(\operatorname{tg}\varphi_{\text{старта}} \cdot \operatorname{ctg} i)}{\omega_3} + m \cdot T_{\text{эф}};$$

где $m = 1, 2, \dots$.

Этап 4. Найти границы интервалов выведения МКА в исследуемую плоскость орбиты заданного наклона с учетом смещения точек старта вследствие вращения Земли.

Найти границы интервалов выведения на восходящей части витка:

$$U_{\text{вывед восх min}} = U_{\text{старта 1}} + \Phi_{\text{вывед min}}, \quad U_{\text{вывед восх max}} = U_{\text{старта 1}} + \Phi_{\text{вывед max}}.$$

Найти границы интервалов выведения на нисходящей части витка:

$$U_{\text{вывед нисх min}} = U_{\text{старта 2}} + \Phi_{\text{вывед min}}, \quad U_{\text{вывед нисх max}} = U_{\text{старта 2}} + \Phi_{\text{вывед max}}.$$

Этап 5. Привязать найденные моменты возможных запусков МКА и точек старта к баллистической структуре орбитальной группировки, т. е. обеспечить привязку к базовому МКА:

$$\Delta U_{\text{вывед BC}} = U_{\text{вывед}} - U_{\text{баз.КА}}(t_{\text{вывед}}),$$

где $U_{\text{баз.КА}} = U_{\text{баз.КА}}(t_0) + \omega_{\text{КА}} \cdot (t_{\text{вывед}} - t_0) = \omega_{\text{КА}} \cdot (t_{\text{вывед}} - t_0) = \frac{2\pi}{T_{\text{КА}}} \cdot (t_{\text{вывед}} - t_0)$; $U_{\text{баз.КА}}(t_0) = 0$.

Следовательно, на восходящей части витка искомые границы интервалов заполнения баллистической структуры определяются следующим образом:

$$\Delta U_{\text{вывед BC восх min}} = U_{\text{вывед восх min}} - U_{\text{баз.КА}}(t_{\text{вывед восх min}}) = U_{\text{старта 1}} + \Phi_{\text{вывед min}} - \frac{2\pi}{T_{\text{КА}}} \cdot (t_{M1} + \Delta t_{\text{вывед min}} - t_0); \\ \Delta U_{\text{вывед BC восх max}} = U_{\text{вывед восх max}} - U_{\text{баз.КА}}(t_{\text{вывед восх max}}) = U_{\text{старта 1}} + \Phi_{\text{вывед max}} - \frac{2\pi}{T_{\text{КА}}} \cdot (t_{M1} + \Delta t_{\text{вывед max}} - t_0).$$

На нисходящей части витка:

$$\Delta U_{\text{вывед BC нисх min}} = U_{\text{вывед нисх min}} - U_{\text{баз.КА}}(t_{\text{вывед нисх min}}) = U_{\text{старта 2}} + \Phi_{\text{вывед min}} - \frac{2\pi}{T_{\text{КА}}} \cdot (t_{M2} + \Delta t_{\text{вывед min}} - t_0); \\ \Delta U_{\text{вывед BC нисх max}} = U_{\text{вывед нисх max}} - U_{\text{баз.КА}}(t_{\text{вывед нисх max}}) = U_{\text{старта 2}} + \Phi_{\text{вывед max}} - \frac{2\pi}{T_{\text{КА}}} \cdot (t_{M2} + \Delta t_{\text{вывед max}} - t_0).$$

Этап 6. Провести перебор суток ($m = 1, 2, \dots, 7$).

Для наглядности полученных результатов можно представить их в графическом виде как диаграмму – изображение множества интервалов выведения МКА на орбиту заданного наклона (на восходящей и нисходящей части витка) за период $T_{\text{иссл}}$.

Этап 7. Рассчитать возможности функционального подразделения формирования по выведению МКА.

Возможности функционального подразделения оцениваются геометрической вероятностью выведения $P_{\text{вывед}}$ МКА ракетой-носителем заданного типа в расчетную ячейку целевой орбиты для фиксированных координат $(\varphi_{\text{старта}}; \lambda_{\text{старта}})$ точки старта в центре выбранного района расположения в течение периода $T_{\text{иссл}}$.

Искомая вероятность $P_{\text{вывед}}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{\text{вывед}} = \frac{|I_{\text{вывед}}|}{2\pi},$$

$$\text{где } I_{\text{вывед}} = \left(\bigcup_{j=1}^m I_{\text{восх } j} \right) \cup \left(\bigcup_{j=1}^m I_{\text{нисх } j} \right).$$

Таким образом, анализ возможностей функционального подразделения формирования запуска МКА по развертыванию требуемой орбитальной группировки при его применении в границах района расположения позволяет сделать вывод об их повышении путем рационального выбора точек старта ракеты космического назначения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПУСКА МКА И СПОСОБОВ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Обоснование рационального состава формирования (количества функциональных подразделений, выбора районов расположения на местности, размеров районов расположения и способов его использования) проводилось по двум взаимосвязанным направлениям:

1. Оценивание путей повышения возможностей функционального подразделения формирования запуска МКА за счет перемещения ракеты космического назначения в пределах района расположения, который задается кругом.

2. Расчет оптимальных значений азимута перемещения ракеты космического назначения, при которых обеспечивается наибольшее отклонение точки выведения космического аппарата на целевую орбиту относительно базовой.

Исходные данные такой задачи совпадают с условиями предыдущей задачи за исключением того, что координаты возможной точки старта не являются фиксированными, а принадлежат району расположения, задаваемому кругом с центром $(\varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}})$ и радиусом L . Требуется определить повышение возможностей функционального подразделения формирования запуска МКА, характеризуемых увеличением вероятности $\Delta P_{\text{вывед}}$, за счет использования возможности маневрирования в пределах района расположения, а также рассчитать оптимальные азимуты A^* направления перемещения ракеты космического назначения функционального подразделения формирования запуска спутника, которые обеспечивают максимальное приращение вероятности выведения МКА на заданную орбиту $A^* = \arg \max_A \Delta P_{\text{вывед}}(A)$.

При создании методики необходимо учесть состав и размещение в районах расположения функциональных подразделений; особенности запуска МКА мобильными средствами выведения; характеристики МКА и ракеты-носителя; орбитальное построение группировки МКА.

Найти наиболее предпочтительные варианты перемещения ракеты космического назначения мобильного ракетно-космического комплекса функционального подразделения формирования запуска спутника, обеспечивающие максимальное приращение вероятности выведения МКА на заданную орбиту.

Назовем основные этапы методики решения оптимизационной задачи.

Этап 1. Определить интервал выведения МКА при пересечении трассы ячейки области – зоны ответственности мобильного ракетно-космического комплекса: $R_{30} \leq L_{ход}$, где R_{30} – множество возможных точек старта, некоторая область – зона ответственности мобильного ракетно-космического комплекса с определенным радиусом; $L_{ход}$ – расстояния, определяемые запасом по ходу пусковой установки.

Этап 2. Рассчитать оптимальные азимуты A^* направления перемещения ракеты космического назначения мобильного ракетно-космического комплекса формирования запуска спутника, которые могут обеспечить максимальное приращение вероятности выведения МКА на заданную орбиту:

$$A^* = \arg \max_A \Delta P_{\text{вывед}}(A).$$

Этап 3. Найти такие значения A^*, L^* , которые способны обеспечить заданную вероятность выведения МКА:

$$A^* = \arg \min_A L(A \in (0, 2 \cdot \pi) | P_{\text{вывед}}(A, L)) = P_{\text{вывед. задан}}.$$

Этап 4. Определить границы интервалов выведения МКА как моменты времени подхода зоны своей границей к плоскости орбиты и выхода из нее.

Этап 5. Определить множество координат точек старта и времен запуска t_3 МКА в n ячейку. Это целесообразно решить путем аппроксимирования маршрутов выдвижения подвижной пусковой установкой ломаной линией и решением совместного уравнения для отрезков ломаной линии и параболы – трассы ячейки за время ее прохождения зоны ответственности формирования запуска спутника. При этом аргумент широты ячейки на момент времени t_3 определяется выражением:

$$U_n(t_3) = \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_n(t_3)}{\sin i}\right), \text{ а } t_3 = \frac{T_d \cdot (U_n(t_3) - U(t_0))}{2\pi}.$$

Исходя из оценки условий выполнения задачи по запуску, необходимо выбрать конкретные координаты точки старта и время запуска КА в n ячейку.

Этап 6. Определить окончательное время пуска $t_{\text{пуска}}$ ракеты космического назначения с учетом времени на выведение МКА $t_{\text{вывед}}$:

$$t_{\text{пуска}} = t_3 - t_{\text{вывед}}$$

Этап 7. Оценить возможность достижения расчетной точки старта, находящейся в пределах зоны ответственности формирования:

$$t_{\text{приб}} = \tau_l + l_{\text{ст}} \cdot v_l,$$

где τ_l – время подготовки подвижной пусковой установки ракетно-космического комплекса заданного типа к пуску из установленной степени готовности;

v_l – скорость передвижения подвижной пусковой установки ракетно-космического комплекса заданного типа;

$l_{\text{ст}}$ – расстояние до точки старта.

Таким образом, для запуска МКА в ячейку с пусковой установки мобильного ракетно-космического комплекса формирования необходимо, чтобы $t_{\text{приб}} \leq t_{\text{пуска}}$.

Общее количество пусков мобильными ракетно-космическими комплексами заданного типа функционального подразделения формирования запуска спутников оценивается при последовательном прохождении зон ответственности через все орбитальные плоскости космической системы на заданном интервале времени $T_{\text{иссл}}$. Определив моменты запусков МКА функциональными подразделениями, получим план-график задействования формирования запуска МКА с учетом выдвижения его функциональных подразделений с целью выбора его рационального варианта.

Вывод. Представленные методики позволяют поэтапно решить задачу обоснования оптимальных вариантов перемещения элементов ракетно-космического комплекса в пределах заданного района расположения в целях реализации максимально достижимых возможностей формирования запуска МКА, обосновать количественный состав формирования, определить координаты районов расположения и способы использования его функциональных подразделений.

Список используемых источников

1. *Волковский Н.Л.* История информационных войн. В 2 ч. – СПб.: Полигон, 2003. – 502 с.
2. *Горбулин В.И.* Оптимизация развертывания космических систем: монография. – МО РФ, 2003. – 102 с.
3. *Горбулин В.И., Михеев О.Ю.* Методика обоснования рационального состава и районов расположения мобильных средств запуска малых космических аппаратов // Научно-методологические аспекты космической деятельности России. – СПб.: Наука, 2009.

С.А. Елисейкин,
кандидат техн. наук, старший научный сотрудник
ФГУП «ЦЭНКИ», г. Москва;

В.А. Подрезов,
доктор техн. наук, старший научный сотрудник
ФГУП «ЦЭНКИ», г. Москва;

А.М. Полуаршинов,
кандидат техн. наук
ФГУП «ЦЭНКИ», г. Москва;

Н.В. Ширшов,
кандидат физико-математических наук
ФГУП «ЦЭНКИ», г. Москва

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА РАЙОНОВ ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Рассмотрены вопросы оценки минимальных размеров районов падения отделяющихся частей ракет-носителей, которая обеспечивается уточнением расчетной модели их движения в атмосфере по данным о фактических точках падения и применением детальных методов учета метеопараметров при подготовке данных на пуски, в том числе с использованием оперативной информации.

Ключевые слова: район падения, фактические точки падения, отделяющаяся часть, ракета-носитель, вариации параметров атмосферы, статистические оценки, стандартная атмосфера, локальная модель атмосферы.

Проведение запусков космических аппаратов с российских космодромов требует отведения по трассе полета ракет-носителей (РН) специальных территорий, предназначенных для падения (посадки) на Землю отработавших элементов конструкции РН – ступеней, головных обтекателей, соединительных/хвостовых отсеков, спускаемых аппаратов и капсул. Оптимальные размеры и местоположение районов падения (посадки) отделяющихся частей (РП ОЧ) определяются требованиями к начальным орбитам выведения космических аппаратов (КА) и летно-техническим характеристикам РН и должны удовлетворять определенным требованиям, к числу которых относится требование, чтобы размеры РП ОЧ позволяли принять все фрагменты ОЧ с заданной вероятностью.

Во времена СССР отведение районов падения для приема отделяющихся частей ракет-носителей (РН) являлось чисто технической задачей (по заявкам разработчиков космических ракетных комплексов отводились территории требуемых размеров). В современной России ситуация кардинально изменилась. Развитие наземной хозяйственной инфраструктуры, принятие земельного законодательства, ужесточение экологических требований значительно затруднили решение данной задачи [1, 2]. Поэтому в настоящее время возможность отведения новых районов падения является одним из важных условий осуществления запуска КА на требуемую орбиту. Иногда, для районов падения на зарубежных территориях, эту задачу приходится решать на уровне высшего руководства государств.

Выделяемые территории под РП ОЧ необходимо совместить с имеющейся наземной инфраструктурой. В связи с этим актуальна задача детального расчета минимального размера РП, что, в свою очередь, связано с необходимостью использования моделей описания движения ОЧ, адекватно отражающих реальные условия пусков. Здесь следует отметить два аспекта.

Первый связан с уточнением аэродинамических характеристик ОЧ. Статистические оценки отклонений фактических точек падения относительно расчетных точек прицеливания показывают на наличие существенных систематических отклонений практически на всех

трассах запусков и для всех типов ОЧ (табл. 1 и 2). На основе учета данных систематических отклонений могут быть даны оценки коэффициентов лобового сопротивления ОЧ, используемых при разработке моделей описания их движения [3].

Таблица 1

Систематические отклонения точек падения фрагментов отделяющихся частей РН «Союз» относительно точек прицеливания по дальности, км

Отделяющиеся части	«ТМА»	«Прогресс»	«ФГ» на 51,8	«Союз-2»
Двигательная установка системы аварийного спасения	-15	–	–	–
Боковые блоки (ББ)	-10	-7	-14	-10
Головной обтекатель (ГО)	-10	-12	-13	-13

Таблица 2

Систематические отклонения точек падения фрагментов отделяющихся частей РН «Протон» относительно точек прицеливания по дальности, км

Первая ступень	Головной обтекатель		
	на 48°	на 51,7°	на 64°
-3	-11	-9	-14

Второй аспект связан с учетом параметров атмосферы при подготовке данных на пуски и оценке параметров рассеивания фактических точек падения. До настоящего времени в большинстве случаев расчет номинальной точки падения ОЧ осуществляется по модели стандартной атмосферы [4].

Отсутствие учета географии РП и сезонности приводит к существенным систематическим отклонениям точек падения по дальности: для тяжелых ОЧ (первых ступеней, боковых блоков) ~ до 10 км; для легких ОЧ [ГО, хвостовой отсек (ХО) и соединительный отсек (СО)] ~ более 30 км (рис. 1 и 2) [1].

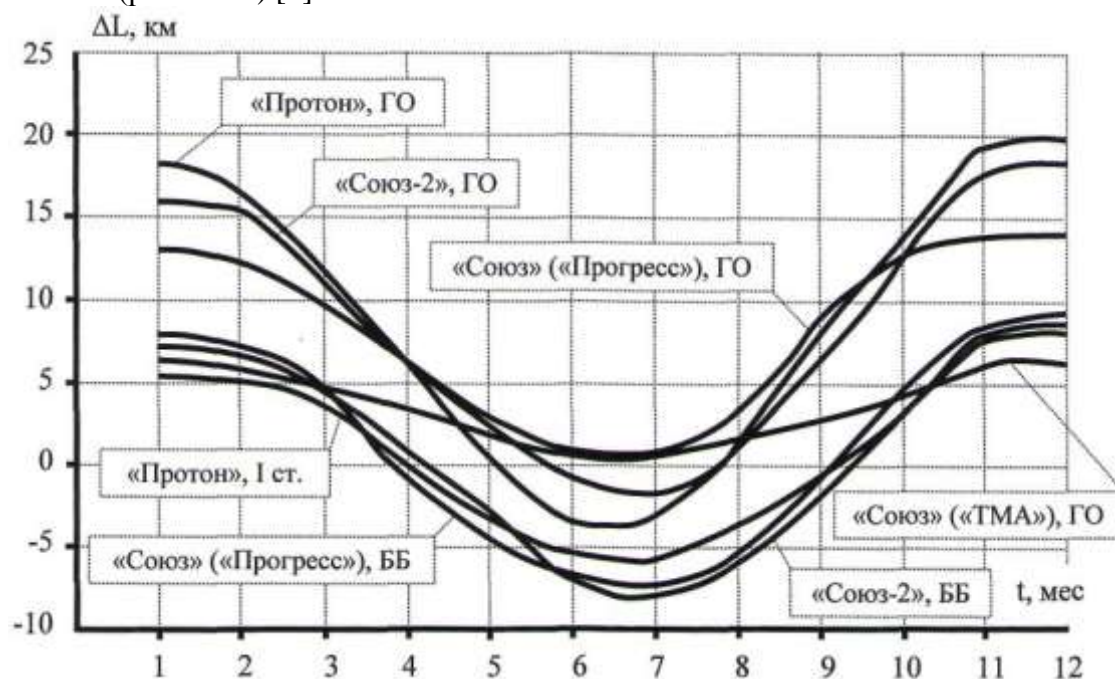


Рис. 1. Систематические отклонения точек падения отделяющихся частей РН по дальности, обусловленные отличием параметров атмосферы от стандартных

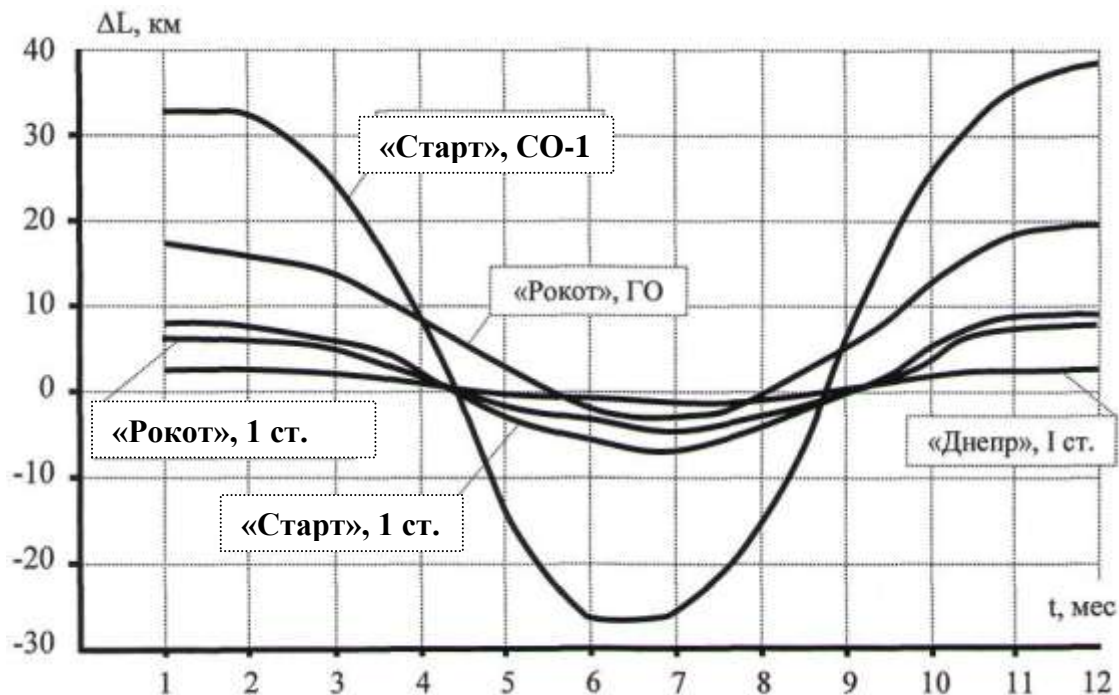


Рис. 2. Систематические отклонения точек падения отделяющихся частей конверсионных РН по дальности, обусловленные отличием параметров атмосферы от стандартных

Отклонения по боку ~ в 2-3 раза меньше. Для учета данной систематической составляющей в отраслевом стандарте (ОСТ) расчета параметров атмосферы предусмотрен случай оценки их вариаций относительно параметров стандартной атмосферы. Применительно к тяжелым ОЧ (первая ступень РН «Протон», боковые блоки РН «Союз») эти вариации «накрывают» эллипсы рассеивания, полученные по локальным моделям для крайних месяцев года – января, июля (рис. 3).

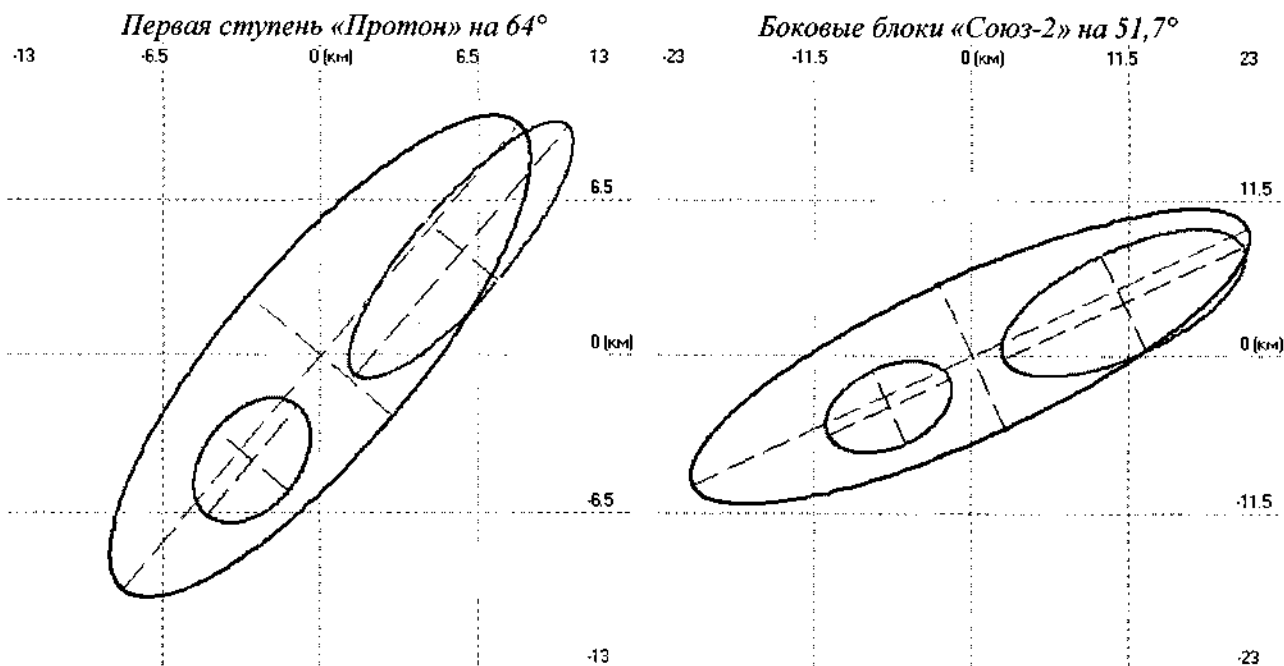


Рис. 3. Оценка точности учета вариаций параметров атмосферы относительно стандартных (тяжелые ОЧ)

Для легких типов ОЧ (ГО) учет вариаций параметров атмосферы в соответствии с ОСТ (рис. 4) не позволяет учесть совместное влияние сезонных систематических и случайных вариаций (это и является вероятной причиной периодических выходов фрагментов ГО за пределы РП).

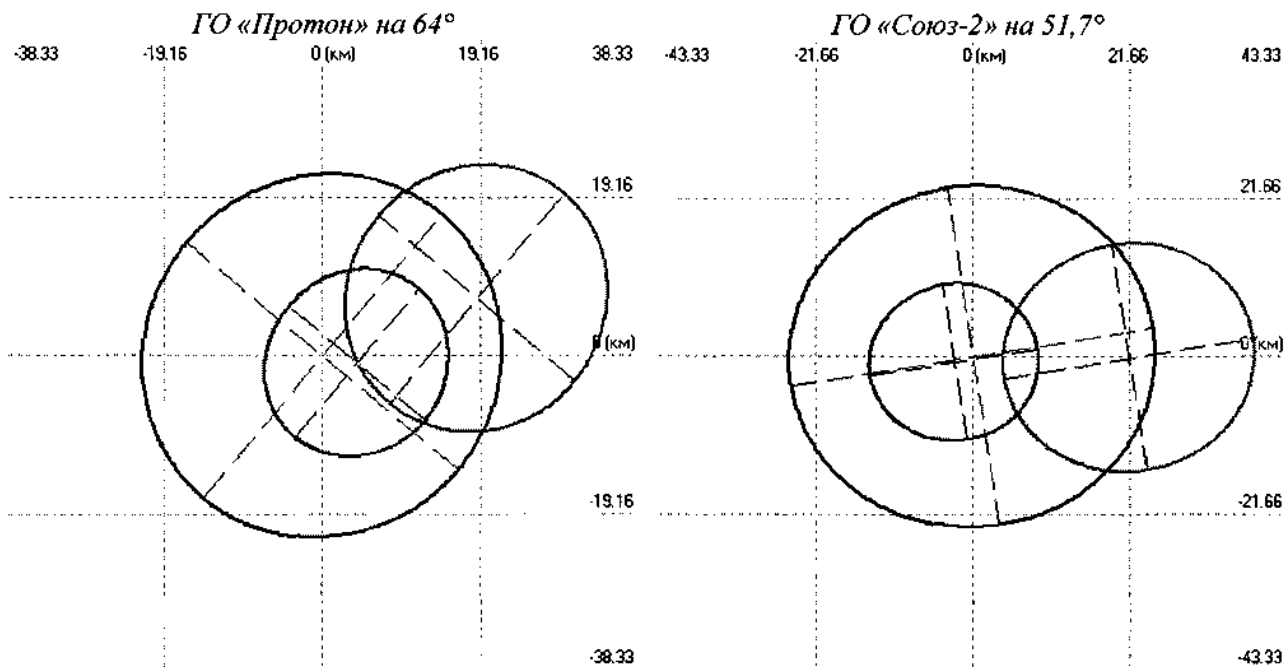


Рис. 4. Оценка точности учета вариаций параметров атмосферы относительно стандартных (легкие ОЧ)

Выполненный в соответствии с отраслевым стандартом анализ расчета вариаций относительно среднемесячных значений (чистые случайные вариации) также показывает, что их величины существенно отличаются от реальных значений, полученных на основе первичных данных зондирования (рис. 5 и 6).

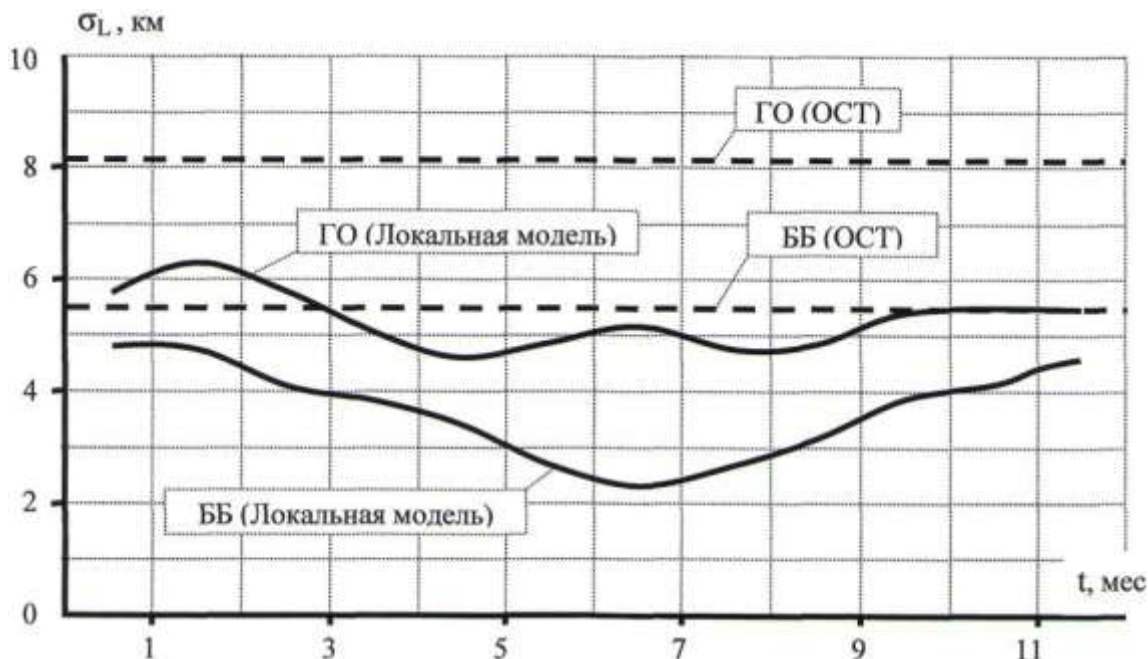


Рис. 5. Оценка точности учета вариаций параметров атмосферы относительно средних месячных значений по дальности

Таким образом, ОСТ можно использовать только для получения некоторых средних (общих) оценок влияния вариаций метеопараметров на движение ОЧ РН (для конкретных условий пуска необходимо применять модели атмосферы, учитывающие географические условия РП и сезонный фактор).

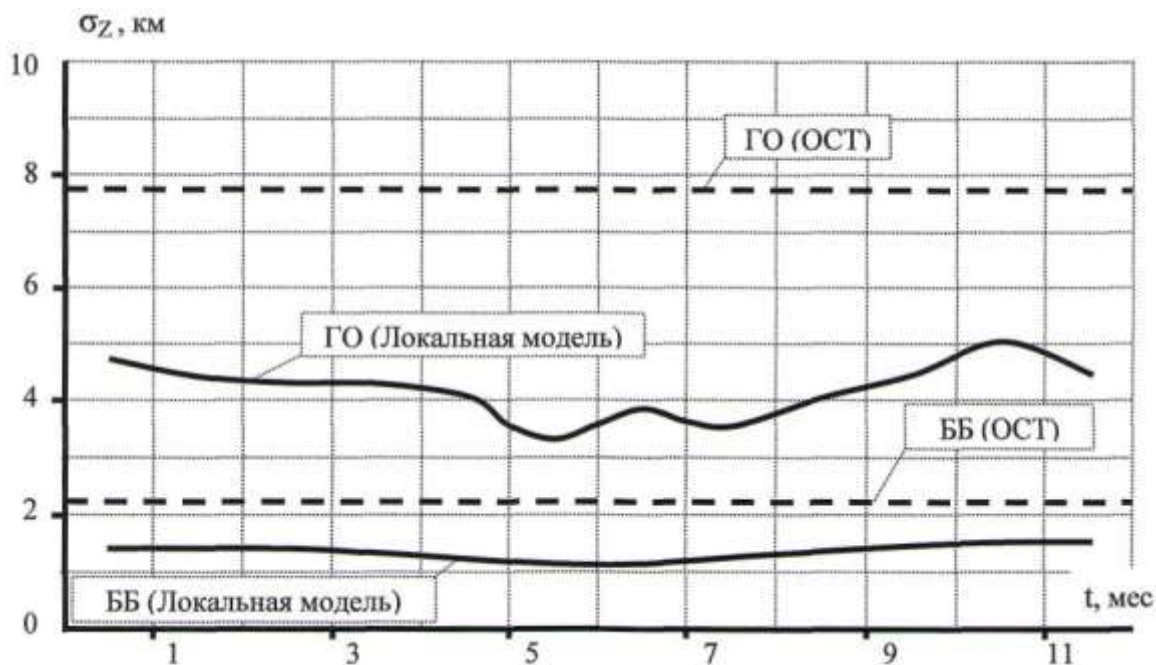


Рис. 6. Оценка точности учета вариаций параметров атмосферы относительно средних месячных значений в боковом направлении

Исходя из вышеизложенного, наиболее детальный учет параметров атмосферы при расчете движения ОЧ целесообразно осуществлять на основе локальных сезонных моделей возмущенной атмосферы для РП. Эти модели строятся на основе многолетних данных местных метеоизмерений, поэтому практически лишены методических погрешностей [5, 6]. Такая идеология в настоящее время применяется для метеообеспечения пусков РН «Союз-2» с космодрома Восточный (разработаны локальные модели атмосферы как для самого космодрома, так и для девяти РП по трем трассам запусков КА).

В табл. 3 приведены характеристики рассеивания фактических точек падения ОЧ РН «Союз» относительно точек прицеливания, рассчитанных по параметрам стандартной, локальной атмосферы и оперативной метеоинформации на момент проведения пуска, а также отношение площадей соответствующих эллипсов рассеивания. Как видно, переход от модели стандартной атмосферы к локальным моделям позволяет уменьшить площадь эллипса рассеивания на 30–55 %, а дальнейший переход к оперативной метеоинформации — еще примерно на столько же.

Для расчета протяженного участка полета третьей ступени (блока «И») и РП по новым трассам пусков построена глобальная модель средних месячных значений параметров атмосферы и глобальная модель вариаций метеопараметров относительно средних месячных значений. При этом реализован один из подходов к построению глобальных аналитических пространственно-временных моделей средней атмосферы, основанный на разложении четырехмерных полей метеопараметров (относительных плотности и давления, температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра как функции высоты, широты и долготы точки, номера месяца) в ряд по системе базовых тригонометрических функций с последующим ранжированием коэффициентов по их вкладу в точность аппроксимации. Таким образом обеспечивается оптимальность моделей по критерию «точность — объем данных». Рассматриваемый диапазон высот: 0–100 км.

Таблица 3

**Сравнительные характеристики рассеивания фактических точек падения
отделяющихся частей РН «Союз» относительно точек прицеливания,
рассчитанных по моделям стандартной, локальной и оперативной
атмосферы (N – объем выборки), км**

Модель атмосферы	Союз (ТМА)						Союз (Прогресс)					
	Боковые блоки			ГО			Боковые блоки			ГО		
	N	σ_L	σ_Z	N	σ_L	σ_Z	N	σ_L	σ_Z	N	σ_L	σ_Z
Стандартная	83	5,8	2,3	53	5,5	2,6	140	8,2	2,4	108	9,5	6,2
Локальная	83	4,7	2,0	53	3,9	2,3	140	5,2	1,7	108	7,5	4,3
Оперативная	63	3,9	1,6	42	2,6	1,6	106	4,2	1,2	80	5,7	3,7
$S_{\text{опер}}/S_{\text{станд}}$	0,47			0,29			0,26			0,36		
$S_{\text{опер}}/S_{\text{лок}}$	0,66			0,46			0,57			0,65		
$S_{\text{лок}}/S_{\text{станд}}$	0,70			0,62			0,45			0,55		

Получение исходного архива для аппроксимации основано на использовании архива среднемесячных значений метеопараметров в узлах регулярной картографической сетки по данным аэрологического зондирования атмосферы на высотах от 0 до 30 км (ВНИИГМИ-МЦД) и данных глобальной модели верхней атмосферы, построенной по ракетным и спутниковым данным на высотах от 30 до 100 километров (ЦАО). Например, использование уже первых 200 коэффициентов аппроксимации для модели диапазона высот 0–100 км обеспечивает расчет средних месячных значений относительных плотности и давления, температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра со средними квадратическими погрешностями соответственно 2 %, 2 %, 3 %, 5 м/с, 2 м/с, что может быть достаточно для ряда практических приложений.

Предлагаемый подход к построению глобальных аналитических моделей атмосферы позволяет получать путем выбора определенного числа коэффициентов аппроксимации и диапазона высот целый спектр моделей различной точности, объема данных и быстродействия. Они могут быть использованы как на стадии проектирования образцов ракетной техники, при проведении работ по подготовке данных на пуск, так и непосредственно в бортовых алгоритмах управления полетом. Некоторые из этих моделей объединены в глобальную справочную модель атмосферы на высотах от 0 до 100 км для баллистического обеспечения пусков ракет космического назначения.

Для дальнейшего повышения точности определения характеристик РП ОЧ более корректным представляется использование данных оперативного зондирования на момент отделения ОЧ от РН, а также учет возможного разрушения ОЧ РН в процессе полета [7, 8]. Также необходимо учитывать и систематические сезонные вариации термодинамических параметров атмосферы.

Список используемых источников

1. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения: монография / В.В. Авдошкин, Н.Ф. Аверкиев, А.А. Ардашов и др.; под ред. А.С. Фадеева, Н.Ф. Аверкиева. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 372 с.

2. Аверкиев Н.Ф., Булекбаев Д.А. Задача синтеза экономичных трасс запусков космических аппаратов // Вооружение и экономика. – 2012. – №5 (21). – С. 60–64.

3. *Полуаршинов А.М.* Методические вопросы повышения точности расчета районов падения отделяющихся частей ракет-носителей // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2008. – № 4. – С. 52–56.
4. Оценка соответствия расчетных моделей движения отделяющихся частей РН «Союз» данным пусков с учетом влияния на полет местных сезонных метеоусловий. – М.: ФГУП «ЦЭНКИ», 2009. – 96 с.
5. Разработка локальных моделей возмущенной атмосферы для баллистического обеспечения пусков ракет-носителей. – М.: ФГУП «ЦЭНКИ», 2010. – 67 с.
6. Локальная сезонная модель возмущенной атмосферы для космодрома «Восточный». – М.: ФГУП «ЦЭНКИ», 2011. – 32 с.
7. Технология прогнозирования метеорологических условий пуска ракет космического назначения на космодроме «Восточный» по данным автоматизированной системы метеорологического обеспечения / И.А. Готюр, Ю.В. Кулешов, А.Б. Маков и др. // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 11. – С. 69–79.
8. Методика определения характеристик районов падения отделяющихся частей ракет-носителей с учетом разрушения отделяющихся частей и оперативных данных о состоянии атмосферы / С.А. Богачёв, Д.А. Булекбаев, И.Ю. Кубасов, А.М. Полуаршинов // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2012. – № 635. – С. 14–17.

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРИБЛИЖЕННОГО КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ОПЕРАТОРА ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ РАЗВОРОТОМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С КОНЕЧНЫМ ВЕКТОРОМ УПРАВЛЯЮЩИХ МОМЕНТОВ

В работе рассматривается задача определения программы управления пространственным угловым разворотом динамически несимметричного космического аппарата с конечным вектором управляющих моментов, когда управление происходит по трем каналам одновременно при помощи кинематических уравнений в параметрах Родрига – Гамильтона. Предложенный алгоритм расчета базируется на применении метода приближенного корректирующего оператора. Приведены результаты расчетов, иллюстрирующие сходимость и высокую экономичность с вычислительной точки зрения.

Ключевые слова: космический аппарат, метод приближенного корректирующего оператора, параметры Родрига – Гамильтона, метод Ньютона.

Современный этап развития космической техники характеризуется тенденцией уменьшения массогабаритных размеров космических аппаратов (КА). Сегодня успешное выполнение задач по наблюдению за орбитальными объектами (ОО) непосредственно связано с функциональными возможностями маломассогабаритных КА (МКА). Одна из задач, которые необходимо решить МКА, – это угловой разворот в направлении орбитального объекта до входа в зону наблюдения. Поэтому при создании таких КА большое внимание уделяется разработке бортового комплекса управления в целом и алгоритмов автономной системы управления в частности, т. е. разработка алгоритмов углового движения КА является приоритетной задачей.

Одним из способов управления угловым движением КА является экстенсивное управление, которое заключается в плоском развороте вокруг оси Эйлера [1]. Данное управление накладывает специальные ограничивающие связи, что приводит к повышенным энергетическим затратам топлива. Значительно более экономичные решения получаются при реализации принципа управления по свободным траекториям углового разворота, при котором таких ограничений не накладывает. Поэтому в предлагаемой работе решается задача расчета программы управления пространственным угловым разворотом динамически несимметричного КА ($J_x \neq J_y \neq J_z$) с конечным вектором управляющих моментов, реализуемым с помощью управляющих реактивных двигателей (УРД), когда управление осуществляется по трем каналам одновременно с использованием кинематических уравнений в параметрах Родрига – Гамильтона. Данное управление относится к классу управлений по свободным траекториям. Для непосредственного решения поставленной задачи управления используется метод приближенного корректирующего оператора, который обладает повышенной оперативностью. Получаемые с помощью этого метода управления являются квазиоптимальными с точки зрения удовлетворения условиям оптимальности и обеспечивают выполнение крайних условий наведения с любой заданной точностью.

Рассмотрим алгоритм расчета программы управления угловым разворотом динамически несимметричного космического аппарата с конечным вектором управляющих моментов.

Исходными данными при решении задачи являются:

– начальные и конечные значения векторов углового положения $\bar{\alpha} = (\vartheta, \psi, \gamma)^T$ и угловой скорости $\bar{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ в ССК КА;

– вектор моментов инерции КА $\bar{I} = (I_x, I_y, I_z)^T$;

– время $T_{\text{зад}}$, определяющее продолжительность углового разворота;

– тяговые и моментные характеристики УРД.

При решении задач управления угловым разворотом КА необходимо определить соответствующие параметры – продолжительность работы двигателей ориентации и знаки управляющих моментов по каждому каналу ориентации, обеспечивающие разворот КА из начального углового положения $\bar{\alpha}_1, \bar{\omega}_1$ в требуемое угловое положение $\bar{\alpha}_2, \bar{\omega}_2$ за заданное время $T_{\text{зад}}$. Поставленные задачи управления являются краевыми для соответствующей модели динамики управления и граничных условий.

Решение краевой задачи сводится к решению краевого уравнения

$$\bar{X}(\bar{X}_0, T) = X_T.$$

При решении задачи необходимо использовать следующие уравнения углового движения КА в параметрах Родрига – Гамильтона, так как они не вырождаются в любом положении объекта и отличаются малым числом независимых параметров [3]:

$$\begin{cases} \dot{p}_0 = \frac{1}{2} (0 p_0 - \omega_x p_1 - \omega_y p_2 - \omega_z p_3); \\ \dot{p}_1 = \frac{1}{2} (\omega_x p_0 + 0 p_1 - \omega_y p_2 - \omega_z p_3); \\ \dot{p}_2 = \frac{1}{2} (\omega_y p_0 - \omega_z p_1 + 0 p_2 + \omega_x p_3); \\ \dot{p}_3 = \frac{1}{2} (\omega_z p_0 + \omega_y p_1 - \omega_x p_2 + 0 p_3). \end{cases} \quad (1)$$

где p_0, p_1, p_2, p_3 – параметры Родрига – Гамильтона.

Так как КА является несимметричным, то динамические уравнения Эйлера принимают следующий вид [5]:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \frac{I_y - I_z}{I_x} \omega_y \omega_z + U_x; \\ \dot{\omega}_y = \frac{I_z - I_x}{I_y} \omega_x \omega_z + U_y; \\ \dot{\omega}_z = \frac{I_x - I_y}{I_z} \omega_x \omega_y + U_z. \end{cases} \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи используется метод приближенного корректирующего оператора, обоснованный в работе [4]. Согласно этому методу для решения нелинейных уравнений вида

$$A(\bar{q}) = \bar{p}_T,$$

где оператор A определен неявно на процедурах интегрирования дифференциальных уравнений, применяется следующий вычислительный процесс:

$$\bar{q}_{k+1} = M \left[\bar{p}_T - \sum_{i=0}^k \bar{\Delta}(\bar{q}_i) \right].$$

В этом выражении

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}(\bar{q}_i) &= A(\bar{q}_i) - \bar{p}_T; \\ M[\bullet] &= A_1^{-1}[\bullet].\end{aligned}$$

Причем $M[\bullet]$ есть приближенный корректирующий оператор, выражающий алгоритм решения приближенного уравнения

$$A_1(\bar{q}) = \bar{p}_T.$$

Выбор приближенного уравнения и оператора M может быть осуществлен множеством различных способов в конкретной ситуации с учетом специфики исходной задачи. Для этого могут применяться как формальные приемы упрощения исходных моделей, так и методы их аппроксимации и приближенного решения.

Важной особенностью метода ПКО является то обстоятельство, что для каждой итерации значение $A(\bar{q})$ вычисляется один раз. Применительно к рассматриваемой в данной работе задаче управления это означает, что для очередного уточнения вектора неизвестных параметров дифференциальные уравнения краевой задачи интегрируются один раз. Таким образом обеспечивается высокая экономичность вычислений.

Условия сходимости рассматриваемого вычислительного процесса устанавливаются на основе известного принципа сжатых отображений [4]. Для того чтобы реализовать данный метод при решении поставленной задачи расчета программы управления угловым разворотом несимметричного КА с конечным вектором управляющих моментов, необходимо сформировать соответствующий приближенный корректирующий оператор. В работе в качестве такого оператора принят алгоритм импульсной программы управления угловым разворотом симметричного КА, который может быть представлен следующим образом:

1. Преобразование заданных начальных и конечных углов Эйлера в соответствующие параметры Родрига – Гамильтона [3]:

$$\begin{cases} p_0 = \cos \frac{\Psi}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\Psi}{2} \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2}; \\ p_1 = \cos \frac{\Psi}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\Psi}{2} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2}; \\ p_2 = \sin \frac{\Psi}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \cos \frac{\Psi}{2} \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2}; \\ p_3 = \cos \frac{\Psi}{2} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\Psi}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2}, \end{cases}$$

где Ψ – угол рыскания;

Θ – угол тангажа;

γ – угол крена.

2. При заданных $\bar{p}(t_0) = \bar{p}_0$ и $\bar{p}(T) = \bar{p}_T$ задача сводится к определению $\bar{\omega}_T$ путем решения нелинейного векторного уравнения:

$$\bar{p}_T = \bar{a} \cos \frac{\omega_0 T}{2} + \frac{\sin \frac{\omega_0 T}{2}}{\omega_0} C \bar{\omega}_T,$$

где $\bar{a}(t_0) = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix};$

$$\bar{C}(t_0) = \begin{pmatrix} p_0 & -p_3 & p_2 \\ p_3 & p_0 & -p_1 \\ -p_2 & p_1 & p_0 \end{pmatrix};$$

ω_0 – модуль начальной угловой скорости;

$$\bar{\omega}_{\Pi} = (\omega_{x_0}, \omega_{y_0}, \omega_{z_0})^T.$$

3. Нелинейное векторное уравнение разрешается относительно $\bar{\omega}_{\Pi}$:

$$\bar{\omega}_{\Pi i} = C^{-1} \frac{(\bar{p}_T - \bar{a} \cos \frac{\omega_{0i} T}{2}) \omega_{0i}}{\sin \frac{\omega_{0i} T}{2}},$$

где i – номер итерации. Данное уравнение решается методом простых итераций [2].

4. Для решения задачи необходимо определить начальное приближение для модуля начальной угловой скорости ω_{0i} . С этой целью обратимся к известной теории конечных поворотов твердого тела [5], согласно которой

$$\omega_0 = \frac{2}{T} \arccos r_0,$$

где $r_0 = p_0(t_0)p_0(T) + p_1(t_0)p_1(T) + p_2(t_0)p_2(T) + p_3(t_0)p_3(T)$.

Итерационный процесс продолжается до достижения заданной точности.

5. После определения вектора $\bar{\omega}_{\Pi}$ вычисляются начальные и конечные импульсы угловой скорости:

$$\Delta \bar{\omega}_0 = \bar{\omega}_{\Pi} - \bar{\omega}_0;$$

$$\Delta \bar{\omega}_T = \bar{\omega}_T - \bar{\omega}_{\Pi}.$$

Знаки, полученные при расчете импульсов угловой скорости, используются в качестве знаков управляющих моментов по каждому каналу ориентации.

6. Зная начальные и конечные импульсы угловой скорости, можно определить продолжительность работы двигателей ориентации τ_{ij} по каждому каналу на первом ($\tau_{1x}, \tau_{1y}, \tau_{1z}$) и втором ($\tau_{2x}, \tau_{2y}, \tau_{2z}$) активных участках углового разворота, определяющие моменты их включения и выключения:

$$\begin{cases} \tau_{ix} = \Delta \omega_{ix} \frac{I_x}{M_x}, \\ \tau_{iy} = \Delta \omega_{iy} \frac{I_y}{M_y}, \\ \tau_{iz} = \Delta \omega_{iz} \frac{I_z}{M_z}. \end{cases}$$

Приведенный выше алгоритм рассматривается далее в качестве ПКО при решении задачи расчета программы управления угловым разворотом для динамически несимметричного КА с конечным вектором управляющих моментов, имеющего различные главные моменты инерции по соответствующим осям.

Общая вычислительная схема расчета программы управления угловым разворотом методом приближенного корректирующего оператора имеет следующую последовательность:

1. Пересчет начальных и конечных значений углов Эйлера в соответствующие параметры Родрига – Гамильтона.

2. Расчет программы управления угловым разворотом по приведенному выше алгоритму ПКО.

3. Численное интегрирование кинематических уравнений в параметрах Родрига – Гамильтона и динамических уравнений Эйлера методом Рунге – Кутты четвертого порядка [2].

4. Определение промаха, соответствующего первому приближению по конечным значениям параметров.

5. Определение новой смещенной точки прицеливания и расчет уточненных значений параметров программы управления по алгоритму МПКО.

Далее вычисления повторяются пока не будет обеспечена требуемая точность расчетов.

В качестве примера рассмотрим некоторые результаты численных расчетов программы управления угловым разворотом динамически несимметричного КА, полученные по исходным данным, приведенным в табл. 1. В этой таблице ψ – угол рыскания; ϑ – угол тангажа; γ – угол крена; I_i – моменты инерции по соответствующим осям; $\bar{\omega}$ – векторы начальной и конечной угловой скорости; T – время углового разворота.

Таблица 1

Исходные данные

ψ_0 град	θ_0 град	γ_0 град	ψ_T град	θ_T град	γ_T град	I_x кг·м ²	I_y кг·м ²	I_z кг·м ²	$\bar{\omega}(t_0)$ град/с	$\bar{\omega}(T)$ град/с
0	0	0	28,4	22,05	0	260	240	220	0	0
T с	M_{yx} Н·м	M_{yy} Н·м	M_{yz} Н·м							
15	3,6	5,4	5,4							

В табл. 2 приведены результаты перевода начальных и конечных углов Эйлера в соответствующие параметры Родрига – Гамильтона

Таблица 2

Перевод углов Эйлера в параметры Родрига – Гамильтона

$p_0(t_0)$	$p_1(t_0)$	$p_2(t_0)$	$p_3(t_0)$	$p_0(T)$	$p_1(T)$	$p_2(T)$	$p_3(T)$
1	0	0	0	0,9515	0,047	0,241	0,1854

В табл. 3 представлены сходимость результатов расчета продолжительности работы двигателей ориентации τ_{ij} по каждому каналу на первом и втором активных участках углового разворота.

Таблица 3

Сходимость расчета продолжительности работы двигателей ориентации

Номер итерации	τ_{1x} с	τ_{1y} с	τ_{1z} с	τ_{2x} с	τ_{2y} с	τ_{2z} с
1	0,45	1,45	1,02	0,45	1,45	1,02
2	0,44	1,59	1,08	0,96	3,02	2,12
3	0,44	1,84	1,21	0,50	1,82	1,22
4	0,43	1,68	1,12	0,52	1,66	1,13
5	0,43	1,68	1,12	0,52	1,62	1,12
6	0,43	1,63	1,11	0,51	1,61	1,11

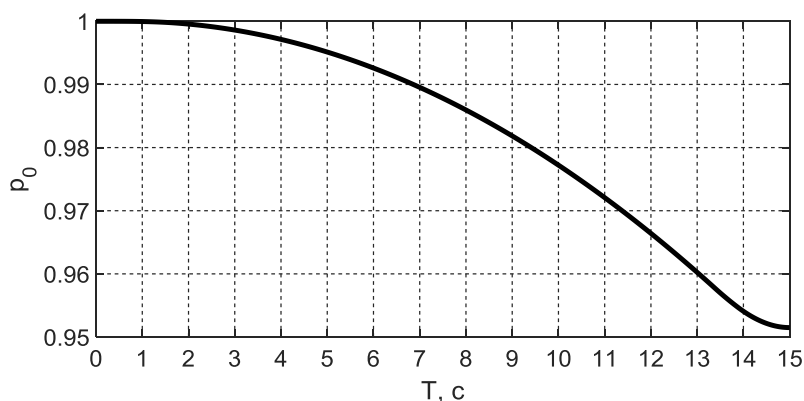
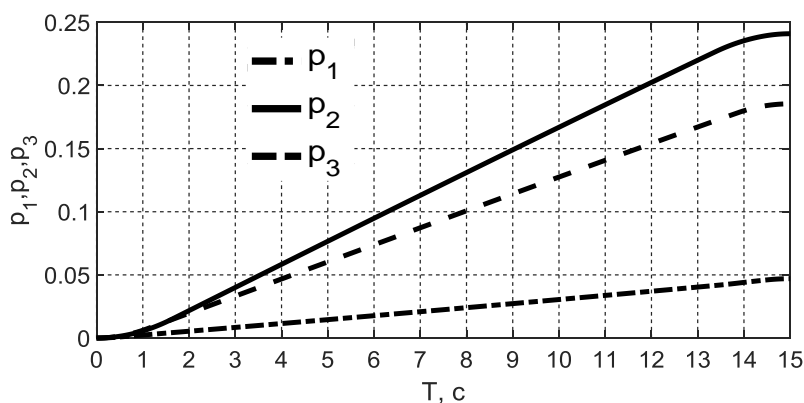
В табл. 4 представлены расчетные данные, иллюстрирующие сходимость алгоритма определения программы управления.

Таблица 4

Сходимость алгоритма управления

Номер итерации	$p_0(T)$	$p_1(T)$	$p_2(T)$	$p_3(T)$
1	0,9593	0,0488	0,2170	0,1738
2	0,9649	0,0467	0,2003	0,1629
3	0,9413	0,0481	0,2663	0,2014
4	0,9491	0,0464	0,2477	0,1884
5	0,9509	0,0468	0,2425	0,1860
6	0,9515	0,047	0,2410	0,1854

На рис. 1 и 2 приведены программы изменения параметров Родрига – Гамильтона p_0, p_1, p_2, p_3 . На рис. 3 показаны программы изменения угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, на рис. 4 – программы углового разворота КА по углам крена $\gamma(t)$, рыскания $\psi(t)$ и тангажа $\vartheta(t)$ соответственно.

Рис. 1. Программа изменения параметра p_0 Рис. 2. Программа изменения параметра $p_{1,2,3}$

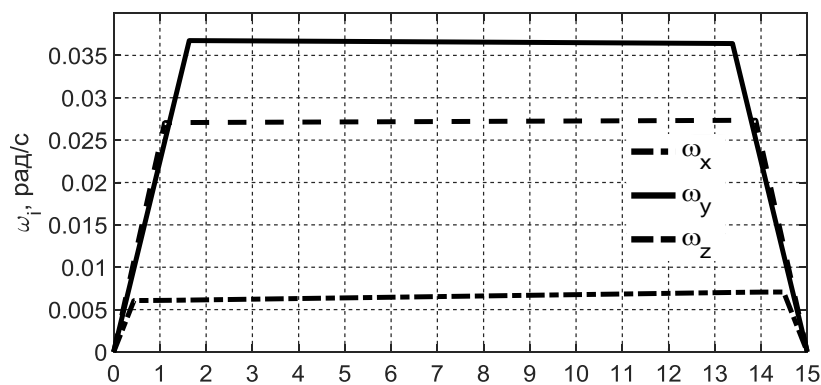


Рис. 3. Зависимость угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ от времени

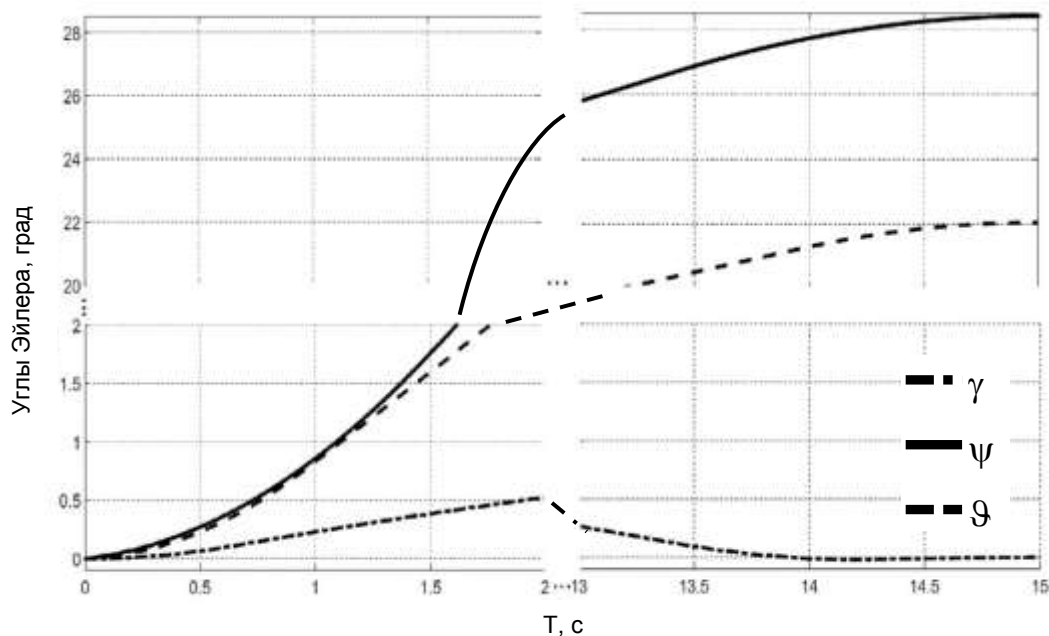


Рис. 4. Зависимость углов Эйлера от времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные исследования показали, что вычислительный процесс сходится за пять итераций. На каждой итерации полная система кинематических и динамических уравнений управляемого углового движения интегрируется один раз, так что общее число интегрирований уравнений движения не превышает пяти раз. Это обстоятельство обеспечивает высокую оперативность расчета программы управления на БЦВМ. Приведенные на рисунках данные свидетельствуют о достаточно высокой точности вычислительного процесса.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что при выполнении пространственного углового разворота по свободным траекториям происходит выигрыш в энергетических затратах топлива, так как предусмотрен участок пассивного углового движения с выключенными УРД. Полученные результаты имеют практическую значимость, так как могут быть непосредственно использованы в составе специального программно-математического обеспечения бортового комплекса управления перспективных КА.

Список используемых источников

1. *Алексеев К.Б.* Экстенсивное управление ориентацией космических летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1977. – 120 с.
2. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
3. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн "ЦНИИ Электроприбор"», 2009. – 280 с.
4. *Миронов В.И., Миронов Ю.В., Юсупов Р.М.* Синтез итерационных алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, №1. – С. 9–15.
5. *Смирнов В.В.* Системы навигации и ориентации космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 155 с.

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

МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В работе представлена модель планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Рассмотрены различные варианты постановки задачи в зависимости от выбранного показателя качества функционирования системы. Формализованы ограничения, накладываемые на процесс целевого применения КА ДЗЗ, и показатели качества применения.

Ключевые слова: космический аппарат, планирование применения, устойчивый план, дистанционное зондирование Земли.

ВВЕДЕНИЕ

К основным тенденциям освоения околоземного космического пространства (ОКП) можно отнести создание космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), предназначенных для сбора информации о совокупности объектов, расположенных на земной поверхности, предварительной обработки информации и передачи данных конечному потребителю. Данные, полученные в ходе ДЗЗ, используются во многих отраслях народного хозяйства и военного дела. В соответствии с основными руководящими документами, регламентирующими деятельность Российской Федерации в ОКП, в ближайшей перспективе планируется количественное увеличение состава орбитальных группировок (ОГ) различного назначения, создание кластеров малых космических аппаратов (МКА), что приведет к росту сложности и масштабности задач, решаемых в ходе управления указанным КС. Кроме того, применение одних и тех же космических аппаратов (КА) осуществляется в интересах разных потребителей, предъявляющих различные требования к качеству применения, прежде всего к совокупности объектов, подлежащих наблюдению с использованием КА ДЗЗ. В этой связи планирование применения КА ДЗЗ в интересах обеспечения информацией различных потребителей тесно связано с необходимостью разработки соответствующих моделей планирования.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Одним из основных показателей качества функционирования КА ДЗЗ является производительность, определяемая числом обслуженных объектов (объектов, информация о которых была предоставлена потребителю) за один рабочий участок (например, один виток). Наибольший интерес с этой точки зрения представляет задача планирования наблюдения группы объектов, размещенной в пределах ограниченной зоны, определенным образом ориентированной относительно трассы движения КА ДЗЗ[9].

Рассмотрим ограниченную пространственно-временную зону (ПВЗ) функционирования КА, характеризуемую интервалом времени обслуживания $T = (t_0, t_f]$ и набором объектов

наблюдения $A = \{a_i, i = \overline{1, n}\}$. Объекты, находящиеся в ПВЗ, называются потенциально наблюдаемыми (обслуживаемыми) на данном интервале [9].

В результате решения задачи баллистического прогноза формируется множество подспутниковых точек (ПСТ), образующих прогнозируемую трассу полета КА, которая может быть аппроксимирована кривой: $\Psi(\vec{y}(t), \{b_j, j = \overline{1, m}\}) = 0$, где $\vec{y}(t)$ – вектор параметров текущего положения ПСТ КА на трассе; $\{b_j, j = \overline{1, m}\}$ – прогнозируемые ПСТ в выбранном координатном базисе, образующем трассу пролета КА через выбранную ПВЗ; t – текущий момент времени, $t \in T = (t_0, t_f]$.

Сформируем множество $C = \{c_i, i = \overline{1, n} \mid c_i \in \Psi(\cdot) = 0\}$ точек трассы $\Psi(\cdot) = 0$, находящихся на кратчайшем расстоянии от соответствующих объектов $A = \{a_i, i = \overline{1, n}\}$. Обозначим за $t_i, i = \overline{1, n}$, момент времени совпадения ПСТ $\vec{y}(t)$ с соответствующей точкой c_i и назовем его траверсным временем a_i объекта [10].

Обозначим за $d_i, i = \overline{1, n}$, модули радиус-векторов, опущенных из точек $a_i, i = \overline{1, n}$, в соответствующие точки $c_i, i = \overline{1, n}$, принадлежащие трассе, и назовем их относительными расстояниями объектов от трассы (относительным траверсным расстоянием). Для получения информации об объекте ось аппаратуры наблюдения должна быть отклонена на некоторую величину $|\varphi_i| = \arccos\left(\frac{(h + R_3)^2 d_i^2 - h^2 R_3^2}{h^2 + 2hR_3}\right)$, называемую углом визирования. Здесь R_3 – радиус Земли, $R_3 \approx 6371$ км; h – высота полета КА. В простейшем случае без учета кривизны земной поверхности может быть применено следующее соотношение: $|\varphi_i| = \arctg\left(\frac{d_i}{h}\right)$.

Таким образом, каждый объект характеризуется своим траверсным временем t_i [момент времени, соответствующий кратчайшему расстоянию от подспутниковой точки (ПСТ) до местоположения объекта c_i на трассе полета КА] и необходимым углом визирования φ_i (угол, на который необходимо совершить поворот визирной оси, чтобы обеспечить наблюдение объекта с требуемым качеством) (рис. 1) [9, 10].

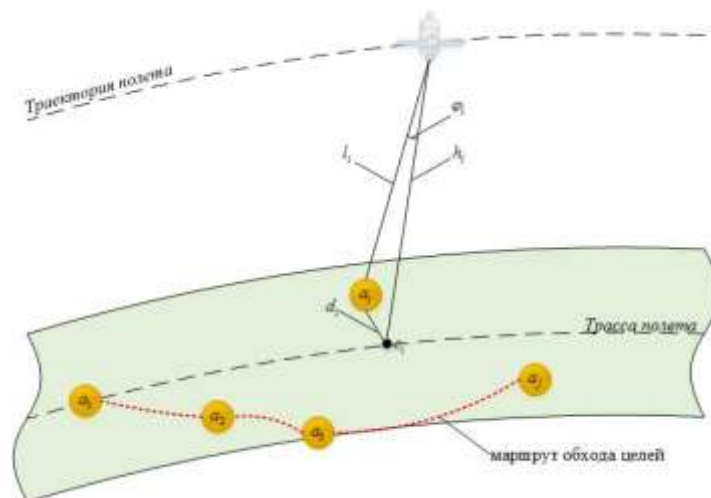


Рис. 1. Возможности обхода КА ДЗЗ

В общем случае динамика относительного движения КА и объектов наблюдения, технические характеристики бортовой аппаратуры (БА) наблюдения и управления угловым положением КА ограничивают возможности получения информации о всей совокупности наблюдаемых объектов. Данное обстоятельство приводит к необходимости постановки и выработки способов путей решения задачи поиска оптимального варианта наблюдения (маршрута обхода объектов). При этом будем полагать, что характеристики ситуации (траверзные времена объектов и углы визирования) заданы, известны также и угловые скорости поворота КА ω относительно визирной оси, тогда в каждый момент времени можно формировать множество номеров объектов, доступных для наблюдения (зона возможного наблюдения).

В настоящее время при управлении КА широко используется так называемый командно-программный принцип управления. Суть данного принципа заключается в формировании временной программы (ВП) – последовательности команд, жестко привязанных к бортовой шкале времени. Тогда задача формирования временной программы сводится к построению маршрута обхода, а именно, определению совокупности объектов, подлежащих наблюдению, с учетом ограничений, определяемых возможностями БА, и отношений предпочтения, задаваемых конечным потребителем.

МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

План применения КА ДЗЗ (маршрут обхода) можно задать некоторым вектором \vec{x} :

$$\vec{x} = \text{col}\langle x_{ik} \rangle, x_{ik} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, K}. \quad (1)$$

Здесь x_{ik} – переменная, принимающая значение 1, если запланировано наблюдение i -го объекта на k -м витке, 0 – в противном случае;
 n – количество объектов наблюдения;
 K – количество витков КА на интервале планирования.

Возможность наблюдения двух объектов на k -м витке КА определяется соотношением

$$\frac{|\varphi_\alpha - \varphi_\beta|}{|t_\alpha - t_\beta|} \leq \omega. \quad (2)$$

Действительно, предположим, что по результатам прогнозирования движения КА 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 $|\varphi_\alpha - \varphi_\beta|$, величиной угла, на который КА должен совершить поворот своей визирной оси за время $|t_\alpha - t_\beta|$, необходимое на совершение данного действия, при условиях, что угловая скорость изменения визирной оси КА не превышает ω . Если данное требование не выполняется, то можно говорить, что операции наблюдения объектов α и β на k -м витке несовместны, или то, что они конфликтуют. Соответствующие ограничения в формализованном виде можно представить как $x_{\alpha k} + x_{\beta k} \leq 1$ для таких наборов параметров (α, β, k) , для которых не выполняется неравенство (2).

В целом несовместность операций наблюдения (конфликты) можно описать рефлексивным бинарным отношением R_k или соответствующим ему неориентированным графом G_k

без петель и кратных ребер, где вершинам соответствуют операции наблюдения, а ребрам – существующие между ними конфликты [2, 6]. Пусть A – матрица инцидентий такого графа, тогда программа обхода объектов будет допустимым планом, если $Ax \leq \vec{e}$, где \vec{e} – вектор, все компоненты которого равны единице.

Проводя анализ графа G_k , можно заключить, что множество его вершин разбивается на подмножества (на клики), соответствующие полным подграфам графа G_k (алгоритм построения клик графа подробно описан в [1]). Из каждой такой клики можно выбрать только одну операцию (вершину), так как все остальные операции данного подмножества (клики) с ней конфликтуют. Данную конфликтную обстановку можно описать с помощью гиперграфа H_k – обобщенного неориентированного графа, вершины которого соответствуют вершинам G_k , а ребрами являются подмножества конфликтующих вершин. Соотнеся теперь с каждым ребром гиперграфа H_k клику в графе конфликтов G_k , условия совместности операций можно записать с использованием матрицы A^c – матрицы инцидентий гиперграфа H_k , $A^c = \|a_{ik}\|, a_{ik} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, K}$. Тогда условия развязывания конфликтных ситуаций при наблюдении объектов зондирования можно формально описать совокупностью линейных алгебраических неравенств:

$$A^c \vec{x} \leq \vec{e}. \quad (3)$$

Потребности конечного s -го потребителя определяют минимально необходимое количество информации V_s , которая должна быть им предоставлена об объектах зондирования. С учетом важности объектов такое требование может быть представлено в следующем виде:

$$W_s(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \psi_{is} v_{ik} x_{ik} \geq V_s, s = \overline{1, S_0}, \quad (4)$$

где ψ_{is} – относительная важность i -го объекта для s -го потребителя; $\psi_{is} \in [0; 1]$;

v_{ik} – объем информации о j -м объекте, получаемой КА на k -м витке;

V_s – потребность s -го потребителя в информации об объектах зондирования;

S_0 – количество потребителей информации.

Получение информации об объектах зондирования связано с расходом ресурсов КА, количество которых, как правило, ограничено. Пусть КА расходует R_0 видов ресурсов, количество каждого ресурса ограничено величиной $P_r, r = \overline{1, R_0}$. Тогда ограничения, связанные с потреблением ресурса Q_r (r -го вида), необходимого для выполнения КА целевой задачи, будут иметь вид

$$Q_r(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K p_{ikr} x_{ik} \leq P_r, r = \overline{1, R_0}. \quad (5)$$

Здесь p_{ikr} – количество ресурса r -го вида, расходуемого КА для получения информации о i -м объекте на k -м витке.

Принято считать, что просмотр i -го объекта на нескольких витках является нецелесообразным с точки зрения расходования ресурсов КА, для получения информации об объекте достаточен его однократный «просмотр». Тогда

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} \leq 1, i = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Ограничения (1), (3)–(6) задают варианты маршрутов обхода совокупности объектов – множество допустимых альтернатив Δ . Количество альтернатив $|\Delta|$ (вариантов планов применения КА ДЗЗ) достаточно велико, в связи с чем целесообразно выбирать наилучший в некотором смысле план \vec{x}^* .

В качестве критерия оптимальности x^* может выступать требование обеспечения потребителей максимальным количеством информации. Тогда

$$\vec{x}^* = \arg \max \left\{ W_s(\vec{x}), s = \overline{1, S_0} \mid \vec{x} \in \Delta^4 \right\}. \quad (7)$$

Здесь Δ^4 – подмножество допустимых альтернатив без ограничений (4), $\Delta^4 \subseteq \Delta$.

В качестве другого критерия оптимальности \vec{x}^* может выступать требование минимизации расходования ресурсов КА. Тогда

$$\vec{x}^* = \arg \min \left\{ Q_r(\vec{x}), r = \overline{1, R_0} \mid \vec{x} \in \Delta^5 \right\}. \quad (8)$$

Здесь Δ^5 – подмножество допустимых альтернатив без ограничений (5), $\Delta^5 \subseteq \Delta$.

Следует отметить, что задачи (7) и (8) являются задачами многокритериальной оптимизации. В качестве решающего правила, позволяющего снять критериальную неопределенность, в задаче (7) целесообразно использовать требование максимизации нижней грани W_0 относительного количества информации, получаемой каждым потребителем. Тогда задача планирования будет иметь вид

$$\vec{x}^* = \arg \max \left\{ W_0(\vec{x}) \mid W_s(\vec{x}) / V_s \geq W_0, s = \overline{1, S_0} \mid \vec{x} \in \Delta^4 \right\}. \quad (9)$$

В задаче (8) целесообразно использовать требование минимизации верхней грани Q_0 относительного расходования ресурса каждого вида при получении информации. При таком планировании работы КА ДЗЗ повышается срок его активного существования. Соответствующая задача будет иметь вид:

$$\vec{x}^* = \arg \min \left\{ Q_0 \mid Q_r(\vec{x}) / P_r \leq Q_0, r = \overline{1, R_0} \mid \vec{x} \in \Delta^5 \right\}. \quad (10)$$

Задачи (9), (10) являются задачами дискретного (булевого) математического программирования и могут решаться с использованием соответствующих методов [3, 4, 5, 8].

Вывод. В работе представлена математическая модель планирования применения КА ДЗЗ, рассмотрены различные варианты постановки задачи в зависимости от выбранного показателя качества функционирования системы, учтены технологические, пространственно-временные и ресурсные ограничения. Полученные задачи относятся к классу задач линейного булева программирования.

Список используемых источников

1. Москвин Б.В. Построение клик простого графа // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1986. – Вып. 7. – С. 66–72.
2. Комбинированные модели управления структурной динамикой сложных технических объектов / Б.В. Москвин, Е.П. Михайлов, А.Н. Павлов, Б.В. Соколов // Известия Вузов. Приборостроение. – 2006. – Том № 49, № 11. – С. 8–12.
3. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. – Л.: ЛГУ, 1959. – С. 36–38.

4. Данциг Дж. Линейное программирование, его обобщения и применение. – М.: Прогресс, 1966. – С. 52–63.
5. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965.
6. Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. № 5. – С. 143–168.
7. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский, И.И. Делий, Е.А. Новиков; под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
8. Москвин Б.В. Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 385 с.
9. Метод и алгоритм оптимального автономного целераспределения на борту космического аппарата наблюдения / С.В. Зиновьев, Ю.С. Мануйлов, Е.А. Новиков, И.Д. Белобоков // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. – Вып. 23. – МО РФ, 2005. – С. 31–53.
10. Зиновьев С.В., Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А. Оценивание возможностей системы управления угловым движением по перенацеливанию космического аппарата наблюдения // Сборник трудов третьей военно-научной конференции Космических войск. – МО РФ, 2007. – Т. 1. – С. 164–168.

В.А. Поливанов,
кандидат техн. наук
Войсковая часть 54023;
К.О.Тарасевич
Войсковая часть 54023

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрены вопросы поддержания баллистической структуры систем космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на длительном интервале времени. Предложены рекомендации по обеспечению устойчивости на сроке активного существования и совместного функционирования космических аппаратов таких систем.

Ключевые слова: орбитальная группировка, дистанционное зондирование Земли, система космических аппаратов.

В последние годы перечень задач, решаемых космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) непрерывно расширяется [1–9]. Это связано как с развитием технологий создания КА (новые схемы построения оптико-электронных комплексов, новые системы управления движением, увеличение сроков активного существования КА и др.), так и с появлением принципиально новых направлений деятельности, качественная реализация которых без материалов, полученных с КА ДЗЗ, невозможна. Для решения всех этих задач орбитальная группировка (ОГ) КА ДЗЗ должна обеспечивать:

- съемку с заданным линейным разрешением на местности;
- установленную периодичность наблюдения определенных объектов или районов заданного широтного пояса;
- заданную оперативность передачи информации потребителю;
- производительность каждого КА на витке, за сутки, за другой период;
- покрытие полосами обзора всей поверхности Земли за определенный период времени;
- заданную ширину полосы обзора и полосы захвата КА ДЗЗ;
- максимальную длительность одного маршрута съемки КА.

Выполнение данных требований обеспечивается:

- тактико-техническими характеристиками КА ДЗЗ (линейным разрешением на местности, максимальной длительностью одного маршрута съемки КА, производительностью КА, шириной полосы захвата);
- баллистическим построением системы КА ДЗЗ (заданной периодичностью наблюдения, покрытием полосами обзора всей поверхности Земли).

Так, ширина полосы захвата КА ДЗЗ определяется величиной центрального угла φ_3 (рис. 1) и рассчитывается по следующей формуле [10]:

$$R_\varphi = 2R\varphi_3 = 2R \left[\arcsin \left(\frac{r}{R} \sin \gamma \right) - \gamma \right].$$

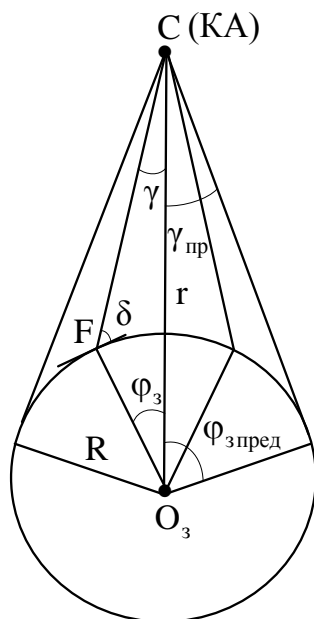


Рис. 1. Параметры землеобзора:

γ – угол полураствора бортовой аппаратуры;

R – радиус Земли; $\varphi_з$ – центральный угол; r – радиус орбиты КА

Как видно, ширина полосы захвата зависит от угла полураствора бортовой аппаратуры наблюдения и от радиуса орбиты КА ДЗЗ.

Линейное разрешение на местности зависит от выбранной оптической схемы (триплета Кука, схемы Ричи – Кретьена, схемы Корша и др.) и характеристик оптико-электронного комплекса и определяется по формуле [11]:

$$L_{\text{лрм}} = \frac{k_{\text{т}} D_{\text{КА}}}{\nu_{\text{р}} f_{\text{ос}}},$$

где $k_{\text{т}}$ – эмпирический коэффициент;

$f_{\text{ос}}$ – фокусное расстояние оптической системы;

$D_{\text{КА}}$ – дальность до объекта наблюдения;

$\nu_{\text{р}}$ – число, обратно пропорциональное периоду решетки тестовой миры.

Производительность КА ДЗЗ определяется как характеристиками самой аппаратуры ДЗЗ, так и скоростью перенацеливания КА с одного объекта наблюдения на другой.

Вместе с тем значительное влияние на возможности ОГ КА ДЗЗ оказывает схема ее баллистического построения. Так, высота орбиты и наклонение КА определяют характеристики трассы полета (межвитковый и суточный интервалы), а значит, и периодичность наблюдения, а также время покрытие полосами обзора всей поверхности Земли. Кроме того, для системы, состоящей из нескольких однотипных КА ДЗЗ, параметрами, определяющими возможность землеобзора, являются:

– прямое восхождение восходящих (нисходящих) узлов орбит каждого КА и их относительное положение по долготе;

– относительное положение по аргументу широты перигея каждого КА ОГ ДЗЗ.

В последние годы для КА ДЗЗ, ввиду особенностей ботовой аппаратуры наблюдения, в качестве основных приняты солнечно-синхронные орбиты (ССО). Данный тип орбит имеет как преимущества, так и недостатки. К преимуществам можно отнести отсутствие теневых участков на всем сроке активного существования КА (рис. 2). В качестве недостатка необходимо отметить, что наблюдение одних и тех же участков поверхности Земли осуществляется в одно и то же местное среднесолнечное время на всем сроке активного существования КА.

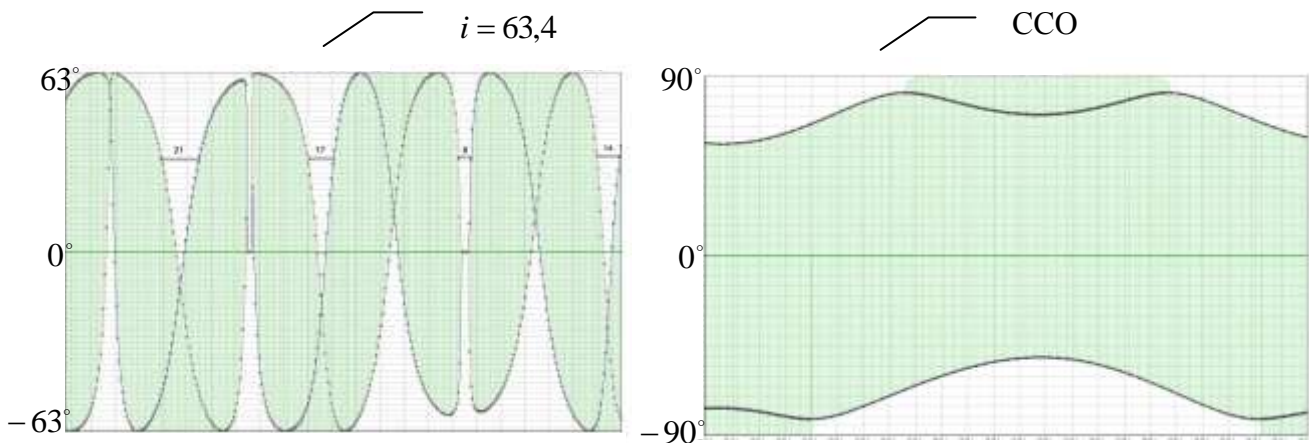


Рис. 2. Сравнение освещенности подспутниковых точек КА на прямой и солнечно-синхронной орбитах на годовом интервале

Параметрами, характеризующими ССО, являются наклонение и высота орбиты, связанные определенной зависимостью (рис. 3). Кроме того, положение плоскости ССО в пространстве характеризуется углом β – углом между направлением на Солнце и плоскостью орбиты, который определяет местное среднесолнечное время прохождения КА восходящего (нисходящего) узла орбиты.

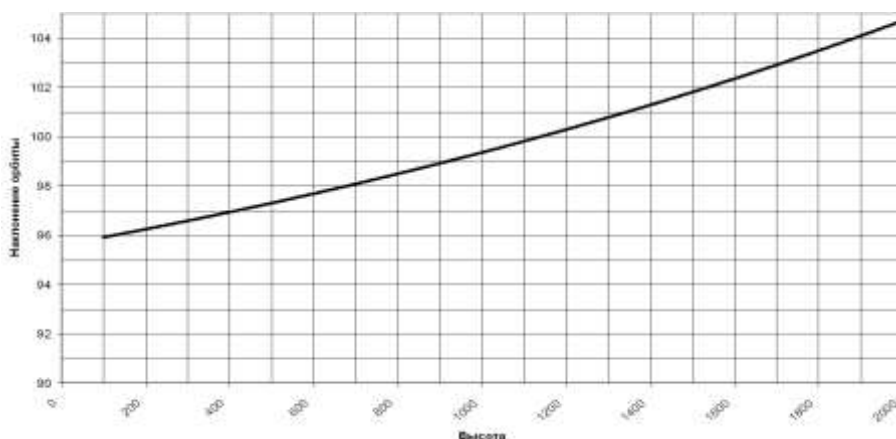


Рис. 3. Зависимость наклонения солнечно-синхронной орбиты от высоты

В случае, если наклонение плоскости орбиты каждого КА системы ДЗЗ не изменяется, для обеспечения требуемой скорости прецессии ССО достаточно поддерживать высоту каждого КА на заданном уровне. Однако на длительном интервале времени, ввиду влияния Солнца, наклонение плоскости ССО прецессирует (за исключением орбит, расположенных в плоскости терминатора). Это приводит к тому, что ССО утрачивает свои первоначальные свойства и часть трассы полета оказывается в тени. При этом скорость прецессии наклонения плоско-

сти орбиты, а соответственно и местного среднесолнечного времени прохождения восходящего (нисходящего) узла орбиты являются функцией угла β (рис. 4).

На длительных сроках активного существования систем ДЗЗ различная величина прецессии наклона плоскости орбиты каждого КА системы ведет к потере системой устойчивости, невыполнению требований к системе, а значит, к невозможности решать возложенные на нее задачи.

Устойчивость системы КА ДЗЗ на длительном интервале времени (год и больше), функционирующей на ССО, может быть обеспечена периодическим проведением некомпланарных маневров поддержания наклона плоскости орбиты каждого КА системы в пределах номинального значения. Однако такой способ обеспечения устойчивости связан со значительным расходом рабочего тела КА. Причем скорость прецессии наклона плоскости ССО непостоянна и со временем увеличивается, а значит расход рабочего тела КА на поддержание устойчивости системы КА ДЗЗ тоже будет увеличиваться.

Более оптимальный с точки зрения эффективности применения ОГ КА ДЗЗ на ССО способ поддержания устойчивости системы предполагает следующий алгоритм:

- на этапе формирования тактико-технических требований к системе КА ДЗЗ на ССО выбирается ее баллистическая структура, в том числе местное среднесолнечное время прохождения каждым КА системы восходящего (нисходящего) узла орбиты;
- в программе полета для каждого КА, учитывая эволюцию наклона всех КА системы ДЗЗ, рассчитывается наклонение плоскости орбиты;
- для каждого возможного положения плоскости орбиты (по углу β) каждого КА системы готовится отдельное полетное задание.

На рис. 4 показана прецессия наклона плоскостей орбит системы из трех КА на ССО с учетом введенных поправок.

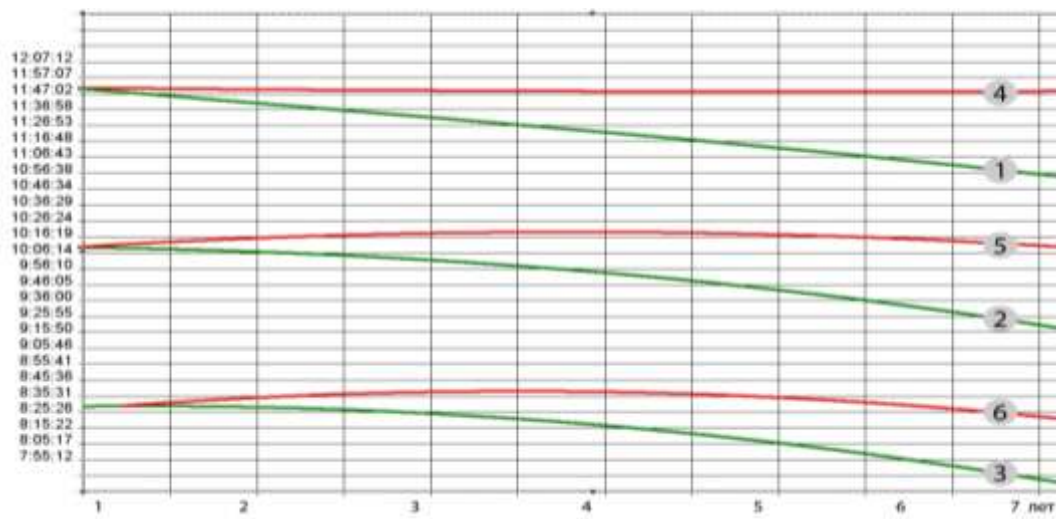


Рис. 4. Изменение местного среднесолнечного времени прохождения восходящего (нисходящего) узла орбиты с учетом поправок

Приведенный выше способ поддержания устойчивости ОГ КА ДЗЗ позволяет на этапе планирования подготовки пуска КА на ССО экономить топливо КА на поддержание солнечно-синхронной ориентации.

В случае, если интервалы времени между запусками КА ОГ ДЗЗ составляют несколько месяцев и более, устойчивость ОГ обеспечит введение упреждения стартового времени, позволяющее варьировать местным среднесолнечным временем прохождения восходящего (нисходящего) узла орбиты, что обеспечит улучшение освещенности подспутниковых точек (рис. 5).

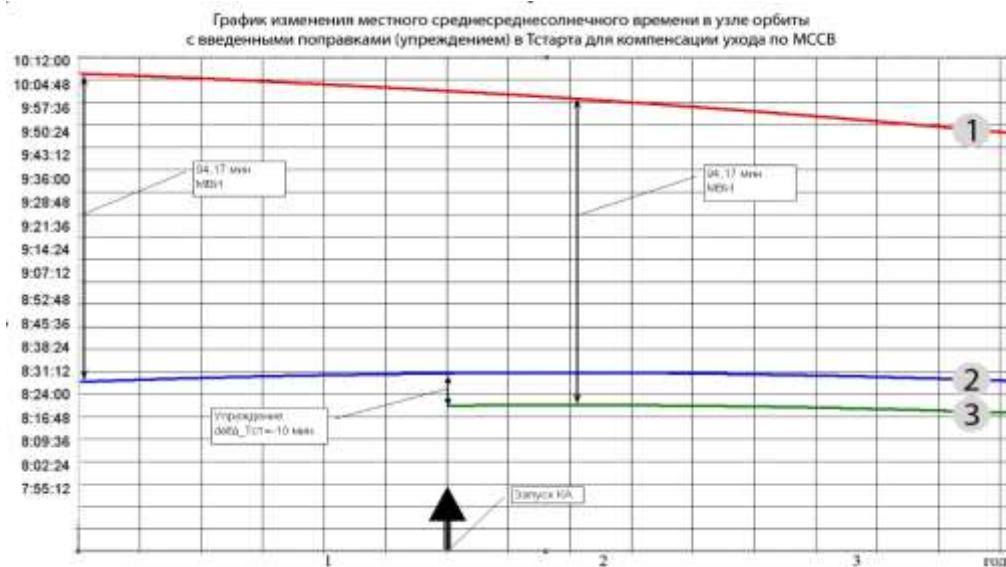


Рис. 5. Изменение местного среднесолнечного времени прохождения восходящего (нисходящего) узла орбиты с учетом введения упреждения времени старта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтез ОГ ДЗЗ является сложным процессом, в котором необходимо учесть множество различных факторов. С увеличением сроков активного существования КА проблема обеспечения устойчивости ОГ ДЗЗ приобретает особую актуальность. Приведенные в статье способы обеспечения устойчивости баллистической структуры ОГ ДЗЗ позволяют выполнить ряд требований, предъявляемых к системам ДЗЗ, а именно:

- повысить периодичность наблюдения определенных объектов или районов заданного широтного пояса;
- обеспечить покрытие полосами обзора всей поверхности Земли за определенный период времени;
- оптимизировать распределение сеансов связи с КА ДЗЗ при передаче специальной информации на Землю.

Учет прецессии наклона ССО КА ДЗЗ и формирования полетных заданий для каждого возможного положения плоскости орбиты (по углу β) каждого КА позволит значительно сэкономить топливо КА для поддержания устойчивости баллистической структуры системы, а следовательно, продлить срок активного существования системы.

Список используемых источников

1. Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник СГАУ. – 2010. – № 2. – С. 80–91.

2. *Балуевский Ю.Н.* О строительстве Вооруженных сил России // Вестник акад. воен. наук. – 2006. – №1. – С. 18–22.
3. *Болсуновский М.А.* Данные дистанционного зондирования Земли высокого разрешения. Ближайшие перспективы // Геопрофи. – 2006. – № 2. – С. 13–15.
4. *Горелов В.А., Лукашевич Е.Л., Стрельцов В.А.* Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // Новости космонавтики. – 2002. – №4 (250). – С. 64–66.
5. *Горелов В.А., Лукашевич Е.Л., Стрельцов В.А.* Развитие космических средств ДЗЗ // Новости космонавтики. – 2004. – №6 (229). – С. 34–52.
6. *Мантуров А.И.* Механика управления движением космических аппаратов: учеб. пособие. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический ун-т, 2003. – 62 с.
7. *Маршалов К.А.* Американские космические аппараты оптоэлектронной разведки // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 10. – С. 64–68.
8. *Маршалов К.А.* Основные направления развития космических оптикоэлектронных средств вооруженных сил США // Зарубежное военное обозрение. – 2015. – № 12. – С. 80–82.
9. *Мечин В.О.* Перспективные космические системы видовой разведки европейских стран // Зарубежное военное обозрение. – 2014. – № 10. – С. 69–73.
10. *Власов С.А.* Основы баллистического проектирования систем КА землеобзора. – Л.: ВИКА, 1998. – 94 с.
11. *Хартов В.В., Ефанов В.В., Занин К.А.* Основы проектирования орбитальных оптикоэлектронных комплексов: учеб. пособие. – М., 2011. – 133 с.

Е.В. Басотин,

кандидат техн. наук;

Ю.А. Гравченко,

кандидат техн. наук, доцент;

Б.К. Гранкин,

доктор техн. наук, профессор;

В.В. Козлов,

доктор техн. наук, профессор;

И.О. Кукушкин,

кандидат техн. наук, доцент;

СИНТЕЗ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОТОКОВ С ЗАДАНЫМ УРОВНЕМ НАДЕЖНОСТИ

Предложен алгоритм синтеза систем распределения и преобразования потоков, основанный на расчете вероятности безотказной работы системы на стадии разработки ее структуры. Алгоритм реализуется путем анализа матрицы смежности графа системы и введения в нее дополнительных вершин с резервированием элементарной функции преобразования рабочей среды системы.

Ключевые слова: синтез, поток, надежность, вероятность безотказной работы, матрица смежности, граф, структурная схема надежности.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам анализа и синтеза систем распределения и преобразования потоков (СРПП) посвящены работы Б.К. Гранкина, В.В. Козлова, И.О. Голикова, М.А. Ковалева [1–7]. Однако в указанных работах практически не рассматриваются задачи исследования надежности сложных технических систем РКТ, в частности такие, как [8]:

1) задание требований по надежности системы и нормирование (распределение) требований по надежности элементов системы [многоуровневая задача, которая решается на всех уровнях структуры системы и ее элементов, вплоть до простых систем, на разработку которых оформляют техническое задание (ТЗ) и на изготовление которых выдают технические условия (ТУ)];

2) анализ выбранной рациональной (оптимальной) структуры системы на предмет обеспечения надежности и обоснования необходимого резервирования (структурного, функционального, нагрузочного, временного, логического, алгоритмического, программного), уровня контролепригодности и восстанавливаемости;

3) обоснование основных принципов (направлений) и программ обеспечения надежности системы и ее элементов с учетом их особенностей;

4) обоснование системы обеспечения и поддержания надежности технической системы в процессе ее эксплуатации;

5) расчет надежности по результатам синтеза структуры системы, проектирования и конструирования.

Учитывая, что [8] исследование надежности сложных технических систем (СТС) начинается с момента выбора облика изделия и его основных элементов (для СРПП с момента завершения синтеза структуры системы), установления потребности, условий и способов применения, а требования по надежности сложной технической системы (изделия) задаются в ТЗ главному разработчику системы в количественной (вероятностной) форме в виде определенной номенклатуры и количественных значений показателей надежности изделия с указанием порядка и условий их подтверждения по стадиям создания, можно предположить,

что синтез СРПП с заданным уровнем надежности может быть реализован в виде итерационного алгоритма, основанного на анализе матрицы смежности синтезированной системы. При этом указанная матрица должна быть представлена в виде, описанном ранее [1–3, 6, 7], т. е. содержать коды простых функций преобразования рабочего тела СРПП и терминальные вершины синтезируемой системы. Однако, учитывая, что такое свойство объекта, как *надежность* является сложным свойством (т. е. состоит из сочетаний свойств: *безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости*), следует ограничить решаемую задачу по одному или двум из них, выбрав соответствующий показатель (показатели) надежности в качестве основного.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ

Определение надежности системы [9], состоящей из элементов, строится на основе структурной схемы системы [структурной схемы надежности (ССН) системы], отражающей алгоритмы функционирования системы. Как правило, эта схема отражает последовательность выполнения функций элементарных преобразований рабочей среды СРПП [6].

Вероятность безотказной работы (ВБР) системы при последовательном соединении элементов вычисляется по формуле [9]

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента системы в ее ССН.

Вероятность безотказной работы системы при параллельном соединении элементов вычисляется по формуле [9]

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i(t), \quad (2)$$

где $q_i(t)$ – вероятность отказа i -го элемента системы.

Реальные системы [9] в большинстве случаев описываются смешанными (т. е. последовательно-параллельными или параллельно-последовательными) схемами (ППС).

В простой ППС расчет производится методом свертки [9], по блокам. Под блоком понимается совокупность элементов, где элементы соединены только параллельно или только последовательно.

Метод свертки [9] не может быть применен в тех случаях, когда один и тот же логический блок должен быть использован в ССН более одного раза. Такие ППС относятся к сложным. Кроме того, далеко не любая система может быть представлена в виде ППС, в частности, это относится к мостиковым структурам. В этих случаях обычно используют логико-вероятностные методы расчета надежности структурно сложных систем.

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОТОКОВ С ЗАДАНЫМ УРОВНЕМ НАДЕЖНОСТИ

Как было указано выше, результатом синтеза СРПП является матрица смежности графа структуры системы. При этом, исходя из условий и ограничений, установленных для данной задачи, следует выделить следующие свойства полученной модели СРПП:

1. Матрица смежности графа СРПП является разреженной, т. е. это матрица с преимущественно нулевыми элементами.
2. Каждая элементарная функция преобразования рабочей среды реализуется только одним элементом системы (резервирование отсутствует).

3. «Мостиковые» элементы отсутствуют (из условий выполнения процедуры синтеза [6, 7]).

4. Одновременная реализация двух и более сложных функций преобразования невозможна.

5. Путь графа из одной терминальной вершины в другую однозначно отражает алгоритм реализации сложной функции.

Учитывая приведенные свойства модели СРПП, графическое представление реализации сложной функции преобразования на матрице смежности может выглядеть так, как показано на рис. 1, где изображена реализация сложной функции на пути из терминальной вершины 2 в терминальную вершину 3.

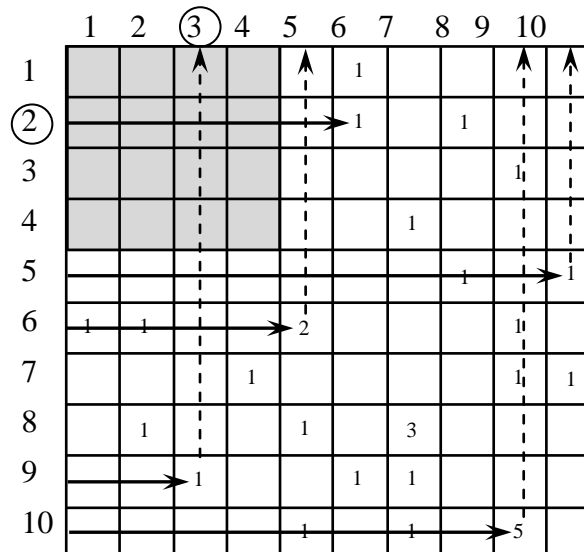


Рис. 1. Графическое представление реализации сложной функции модели СРПП

Очевидно, что среди множества путей в графе для решения задачи синтеза системы распределения и преобразования потоков с заданным уровнем надежности интерес представляют только те пути, которые реализуют алгоритм функционирования СРПП (алгоритм реализации сложной функции). Следует обратить внимание на то, что алгоритм реализации сложной функции подразумевает последовательное выполнение элементарных функций (при участии коммутирующих устройств). Следовательно, после выполнения процедуры синтеза следующим шагом для получения вероятности безотказной работы системы должен стать расчет указанной вероятности для каждого алгоритма функционирования и для системы в целом (при условии последовательного выполнения алгоритмов) по выражению (1). Учитывая, что каждый из структурных элементов ССН в реальной системе может быть представлен в виде конкретного агрегата, соединительного трубопровода, запорного или коммутирующего устройства с уже известной вероятностью безотказной работы, это не вызовет больших затруднений.

После получения значения вероятности безотказной работы системы выполняется процедура сравнения его с заданным показателем. В случае, если полученный показатель меньше заданного, выполняется процедура резервирования структурных элементов. Эту процедуру целесообразно организовать в виде ввода дополнительных вершин и связей с тем же кодом простой функции, что и у резервируемого элемента. При этом ввод резервирующих элементов следует осуществлять последовательно, дополняя матрицу смежности графа системы двумя дополнительными вершинами (т. е. двумя строками и двумя столбцами), в которых и содержится код простой функции и обозначения соединений (коммутаторы). Дополненная

резервированным элементом с кодом 2 матрица смежности показана на рис. 2. При этом, учитывая, что адрес кода простой функции в матрице смежности – (i, j) , а n – количество вершин в матрице смежности (после введения двух дополнительных вершин), из условий физической реализуемости алгоритма функционирования вытекает, что адрес кода резервирующей функции будет $(n, n - 1)$, адреса коммутаторов – $(n - 1, j), (n, i)$ для поддиагональной части матрицы, $(j, n - 1), (i, n)$ для наддиагональной части матрицы.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1						1						
2						1		1				
3									1			
4							1					
5								1		1	1	
6	1	1			2				1			1
7				1					1	1		
8		1			1		3					
9			1			1	1					
10					1		1		5			
11					1							
12						1					2	

Рис. 2. Процедура резервирования элемента с кодом простой функции 2

Таким образом, фрагмент ССН для резервируемого участка примет вид, представленный на рис. 3.

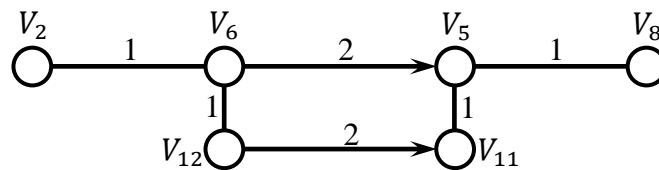


Рис. 3. Фрагмент ССН для резервированного элемента с кодом простой функции 2

Фрагмент ССН, изображенный на рис. 3, может быть разделен на три блока: 1-й блок содержит вершину V_2 и коммутатор, соединенные последовательно; 2-й блок содержит вершины V_6, V_5 , последовательно соединенные простой функцией преобразования с кодом 2 и параллельно соединенные с ними вершины V_{12}, V_{11} с такой же функцией и кодом; 3-й блок содержит вершину V_8 и коммутатор. Теперь при расчете ВБР системы внутри блока 2 необходимо воспользоваться выражением (2), получив таким образом ВБР собственно блока 2, а при расчете ВБР фрагмента ССН, показанного на рис.3, использовать выражение (1) (т. е. провести расчет ВБР по ППС).

Все последующие расчеты ВБР системы следует проводить по прежней схеме: расчет ВБР для каждого алгоритма функционирования и для системы в целом. Затем выполняется новая процедура сравнения заданной ВБР с полученной. При несоответствии – новая итерация и, возможно, другой элемент, подвергающийся резервированию.

Количество итерации и резервируемых элементов целесообразно задавать на начальном этапе синтеза системы распределения и преобразования потоков с заданным уровнем надежности. При исчерпании заданного количества итераций и резервируемых элементов делается вывод о достижимости показателя надежности при указанных начальных условиях и ограничениях. Результатом описанной процедуры является граф системы распределения и преобразования потоков с рассчитанным показателем надежности – ВБР, т. е., по сути, структурная схема СРПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм синтеза СРПП с заданным уровнем надежности содержит:

- 1) процедуру синтеза СРПП путем декомпозиции кода сложной функции в терминальной матрице;
- 2) расчет показателя надежности СРПП – ВБР системы;
- 3) сравнение полученного показателя с заданным;
- 4) процедуру ввода дополнительных вершин в матрицу смежности системы с кодом резервируемой функции в случае, если показатель оказался меньше заданного;
- 5) расчет ВБР системы с резервированным элементом;
- 6) последующие итерации ввода резервирующих элементов в матрицу смежности системы и расчетов ВБР синтезируемой СРПП;
- 7) получение обоснованного вывода о возможности достижения заданного уровня надежности СРПП при предложенных начальных условиях и ограничениях.

Предложенный алгоритм может быть строго формализован и описан любым из языков объектно-ориентированного программирования, что позволит использовать его для разработки автоматизированных систем проектирования СРПП, а также внести вклад в решение научно-технической проблемы, вызванной противоречивой ситуацией, связанной с необходимостью обеспечения высокой степени надежности СРПП РКТ и необходимостью экономии ресурсов при выполнении алгоритмов и программ ее функционирования.

Список используемых источников

1. Основы проектирования ракетно-космических комплексов (методология обоснования облика комплексов) / Г. Бирюков, Б. Гранкин, В. Козлов и др. – СПб.: ООО «Издательство «АЛФАВИТ», 2002. – 395 с.
2. Голиков И.О., Гранкин Б.К. О состоянии нормативного обеспечения сложных технических комплексов // Стандарты и качество. – Москва, 2016. – № 5 (947) – С. 76–80.
3. Кодирование графов для решения задач распределения и преобразования потоков / Ю.А. Гравченко, Б.К. Гранкин, И.О. Кукушкин, Д.О. Мокан // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 649. – С. 23–28.
4. Ковалёв М.А. Метод автоматизации процесса моделирования гидросистем воздушных судов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2009. – № 3. – С. 44–49.
5. Ковалёв М.А. Тензорное представление структуры гидросистем воздушных судов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2009. – № 4. – С. 64–67.
6. Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В. Синтез функциональной структуры систем потокораспределения в технологическом оборудовании ракетно-космической техники / Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т. 1. – С. 94–99.

7. Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В. Автоматизация синтеза функциональной структуры систем потокораспределения в технологическом оборудовании ракетно-космической техники / Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т. 1. – С. 100–104.

8. Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986. – Т.1: Методология. Организация. Терминология / под ред. А.И. Рембезы. – 224 с.

9. Основы эксплуатации объектов космической инфраструктуры: монография / О.В. Антропов, Л.Т. Баранов, А.И. Балысов и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – Т. 2: Теоретические основы эксплуатации объектов космической инфраструктуры, кн. 1. – 425 с.

Е.В. Басотин,
кандидат техн. наук;
Ю.А. Гравченко,
кандидат техн. наук, доцент;
Б.К. Гранкин,
доктор техн. наук, профессор;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
Д.В. Сулаберидзе,
кандидат техн. наук

МОДЕЛИ НЕШТАТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСОВ ЗАПРАВКИ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрена задача обеспечения работоспособности оборудования комплексов заправки ракет космического назначения в нештатных условиях эксплуатации. Обосновывается необходимость и возможность проектного анализа нештатных состояний. Излагаются методы перечисления нештатных состояний, для обоснования требований к средствам контроля и диагностики, а также к тренажно-моделирующим комплексам для отработки действий персонала в нештатных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: комплекс заправки, нештатная ситуация, нештатные условия эксплуатации, дерево функционирования, матрица структуры, матрица операций.

ВВЕДЕНИЕ

В составе ракетно-космических комплексов (РКК) военного назначения особую роль играют комплексы заправки (КЗ) ракет космического назначения (РКН) компонентами ракетного топлива (КРТ) и сжатыми газами (СГ). Их особенности по сравнению с остальными комплексами оборудования РКК проявляются в наличии интенсивного влияния взаимосвязанных факторов, сопровождающих и осложняющих организацию процессов эксплуатации. К таким факторам относятся:

- энергетическая насыщенность, характеризующаяся высоким уровнем затрат энергии различных видов;
- взрывоопасность, пожароопасность, токсичность и коррозионная активность КРТ, наличие скачков давлений и гидроударов в магистралях их транспортировки;
- жесткие требования к точности поддержания физико-химических параметров КРТ и СГ;
- строгая временная регламентация процессов заправки при подготовке пуска РКН;
- высокий уровень психологической напряженности персонала, связанный с высокой интенсивностью динамических процессов, исключительной ответственностью в принятии персоналом решений на управление в различных условиях эксплуатации.

Отмеченные особенности КЗ при *нештатных* условиях эксплуатации (наличие отказов техники, ошибок персонала, негативного воздействия факторов окружающей среды) могут привести в условиях мирного времени к ощутимым потерям ресурсов (материальных, персонала и времени), а в военное время эти потери могут стать невозполнимым, а иногда и недопустимым ущербом.

В нормативно-технических и руководящих документах сформулированы требования по обеспечению надежности ракетно-космической техники [1], прогнозированию и анализу отказов оборудования [2], локализации и ликвидации последствий опасных ситуаций [3]. Однако эти требования расплывчаты, не имеют типовых конструктивных решений, а иногда и

принципиально невыполнимы. Несмотря на наличие требований и принимаемые меры, многолетняя практика эксплуатации заправочного оборудования РКК имеет примеры происшествий в виде взрывов и пожаров, приведших к тяжелым последствиям (травмам, отравлению и гибели персонала, разрушению оборудования стартовых комплексов, заражению окружающей среды токсичными компонентами).

В течение длительного периода развития отечественной техники накоплен значительный опыт исследований и отработки технологии заправки, проектирования и испытаний заправочного оборудования в ведущих конструкторских, производственных, научно-исследовательских организациях и учебных заведениях отраслей промышленности и министерства обороны. Достигнут прогресс в создании информационных технологий для обоснования инженерных решений при проектировании и эксплуатации ракетно-космической техники. Однако, несмотря на это, имеется заметный разрыв между наукой и практикой обоснования решений на управление в *нештатных условиях эксплуатации*. Эта проблема носит концептуальный характер и не вполне осознана, по мнению авторов, специалистами российской промышленности может быть и потому, что до определенного времени практика эксплуатации ракетно-космической техники была прерогативой военных профессионалов. Доказательством этому служит отсутствие в нормативной документации конструктивных требований и рекомендаций по управлению системами и агрегатами в штатных условиях эксплуатации, а содержащиеся рекомендации ограничиваются организационными мерами, диктуемыми интуицией экспертов и обобщенным опытом специалистов по эксплуатации в лучшем случае двух или трех уникальных объектов.

В результате при создании новых КЗ остаются нерешенными важные вопросы:

- контроля и диагностирования штатных ситуаций;
- научного обоснования решений на управление в штатных условиях эксплуатации;
- оснащения операторов информацией, необходимой и достаточной для контроля и управления в таких условиях.

Преодолеть названные недостатки при создании новых КЗ возможно, если эксплуатационные вопросы при проектировании комплексов будут решаться параллельно с проектированием объектов эксплуатации, т. е. начиная с разработки требований к структуре, процессам, средствам контроля и управления, а также к системам поддержки принятия решений.

Для решения подобных задач необходимы методологические принципы и подходы, касающиеся обоснования решений, принимаемых на всех этапах жизненного цикла КЗ и учитывающих влияние факторов, порождающих *нештатные условия эксплуатации*. При этом каждая математическая модель, каждое инженерное решение должны учитывать не только идеальные условия эксплуатации, но и их возможные отклонения. Предлагаемые модели и рекомендации ориентированы на применение в системах автоматизированного проектирования (САПР), в создании систем поддержки принятия решений на управление техникой, а также тренажно-моделирующих комплексов для подготовки персонала к работе в *нештатных условиях эксплуатации*.

ОТРАЖЕНИЕ НЕШТАТНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Существующая нормативная база содержит требования к прогнозированию и оцениванию влияния отказов, ошибок персонала и внешних деструктивных факторов на качество эксплуатации КЗ в составе РКК с помощью показателей, которые вводят согласно принципам статистической теории надежности [1, 2, 3, 4]. Для практики создания и эксплуатации оборудования современных и перспективных КЗ такие оценки бесполезны, поскольку КЗ представляют собой не крупносерийные, а уникальные объекты, которые изготавливают и

эксплуатируют в статистически неоднородных условиях, а проявления нештатных условий эксплуатации столь многообразны, что к их совокупности неприменимо статистическое истолкование вероятности. Что касается обеспечения контроля и управления оборудованием КЗ в упомянутых условиях, то в нормативных документах отсутствует необходимая конкретность, содержатся декларативные положения, которые невозможно ни реализовать, ни подтвердить, ни опровергнуть. Эта неконкретность начинается с формулировок и определенных нормативных терминов, отражающих рассматриваемые условия эксплуатации.

Для упомянутых выше и рассматриваемых далее *нештатных условий эксплуатации* в повседневной практике делового общения специалистов используются термины *нештатное состояние* и *нештатная ситуация*, которые в стандартах и руководящих документах не имеют четких нормативных определений или синонимов. Действительно, термин *нештатное состояние* в приложениях к стандартам отсутствует, а термин *нештатная ситуация* трактуется в различных документах по-разному. Например, в [5] нештатная ситуация определяется как «... состояние систем эксплуатации...», а в «Словаре терминов МЧС 2010 года» – как «...сочетание условий и обстоятельств, отличающихся от предусмотренных проектами, нормами и регламентами...». Такие формулировки для специалистов по проектированию и эксплуатации, во-первых, недопустимы, во-вторых, практически бесполезны и, в-третьих, семантически спорны. Недопустимы потому, что содержат, по крайней мере, два разных термина (*ситуация* и *состояние*) для одного понятия [1], вводя вредную для автоматизации исследований нечеткость. Бесполезны потому, что «сочетание условий и обстоятельств» не поддается ни аппаратурной, ни органолептической идентификации и формализации (формализовать можно признаки и параметры, а не «сочетание условий и обстоятельств»). Спорны потому, что, по нашему мнению, первичным событием в восприятии оператором нештатных условий эксплуатации является *нештатное состояние* объекта эксплуатации, фиксируемое средствами контроля по признакам или значениям параметров. С момента появления такого состояния, по мнению авторов, формируется и развивается *нештатная ситуация*, моделируемая для обоснования решения на управление. Поэтому не ситуация приводит к состоянию, а наоборот, с выявления *нештатного состояния* (НСст) начинается формирование и развитие *нештатной ситуации* (НСц) во времени вплоть до того момента, когда принято решение на продолжение процесса функционирования либо на его прекращение. При этом на формирование и развитие НСц влияют состояния элементов не только контролируемой системы, но и взаимодействующих систем, факторов окружающей среды, а также предыстория процесса функционирования.

Из предыдущего следует вывод о необходимости введения в нормативную базу конструктивных определений терминов *нештатное состояние*, *нештатная ситуация* и методик моделирования нештатных ситуаций. Под конструктивностью здесь и далее понимается однозначная и конкретная формулировка определений и требований в нормативных документах в сочетании с возможностью объективного доказательства выполнения или невыполнения таких требований.

Предлагаемые трактовки терминов *нештатное состояние* и *нештатная ситуация* рассмотрены в ранее выполненных исследованиях [6], где под нештатным состоянием (НСст) объекта эксплуатации понимается «...состояние, не совпадающее с состоянием объекта, указанным в инструкции по эксплуатации для соответствующего момента или интервала времени». Однако наличие НСст лишь свидетельствует об отклонении управляемого процесса от нормы, но не отражает полностью причин и возможных последствий этого отклонения. Следует отметить, что причины НСст объекта контроля зависят не только от состояний его элементов, но и от функционирующих элементов смежных объектов. Поэтому для принятия решений на управление в нештатных условиях эксплуатации оператору необходима следующая информация: модели НСст объекта контроля; состояния элементов системы более высокого уровня иерархии (для КЗ – стартового комплекса), которые влияют на функционирование объекта эксплуатации; предыстория процесса функционирования пере-

численных выше элементов с момента фиксации нештатного состояния до момента принятия решения.

Совокупность элементов объекта контроля и элементов смежных систем, участвующих в функционировании в рассматриваемый момент времени, названа в ранее выполненных исследованиях [7] *операционной системой*. К таким элементам для систем заправки чаще всего относятся системы газоснабжения (с функциями наддува и дренажа емкостей, управления пневмоклапанами), системы вакуумирования, системы электроснабжения (с функциями подачи питания на насосы, электроаппаратуру контроля средства контроля) емкости, а также персонал с функциями управления в соответствии с эксплуатационными обязанностями. Упомянутая необходимая и достаточная информация для принятия решений содержится в моделях, отражающих процессы функционирования объекта эксплуатации с учетом нештатных состояний [8]. В отличие от рекомендаций стандарта построение такой модели для обоснования решений на управление следует вести методами структурно-функционального анализа [9]. Таким образом, под моделью *нештатной ситуации* предлагается понимать дерево функционирования операционной системы объекта эксплуатации от момента появления НСт до момента принятия решения на управление.

Другой важной проблемой управления процессами заправки в нештатных условиях эксплуатации является недостаточная оснащенность объектов эксплуатации средствами контроля и диагностирования НСт в рабочих режимах. Суть проблемы состоит в том, что для контроля множества состояний объектов эксплуатации необходима система контроля, которая обладает не меньшей сложностью, чем сам объект. Эта проблема, называемая условно проблемой наблюдаемости и управляемости, была сформулирована Р. Калманом в его докладе на 1 конгрессе ИФАК еще в 1953 году и до сих пор применительно к РКТ не нашла решения даже на концептуальном уровне. Что касается требований к средствам контроля НСт для КЗ, то в нормативной и проектно-конструкторской документации они отражены декларативно, например в виде требования «разработать перечень нештатных и аварийных ситуаций и способов выхода из них» [10] со ссылкой на нормативные документы, в которых отсутствуют рекомендации по обоснованию полноты упомянутых перечней и способах их создания. Решение этой задачи состоит, во-первых, в перечислении нормальных и нештатных состояний объектов контроля, во-вторых, в построении моделей в виде дерева функционирования с учетом нештатных состояний, в-третьих, в обосновании средств контроля, необходимых и достаточных для управления оборудованием КЗ в нормальных и нештатных ситуациях. Необходимые для этого методологические принципы, модели, методики и алгоритмы приведены в [9].

СИСТЕМНАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Учитывая, что КЗ являются сложными организационно-техническими системами эксплуатации [12], включающими элементы с различной физической природой (вещественные, энергетические, информационные объекты и персонал), необходимо вести научное обоснование их создания и эксплуатации в рамках специализированной методологии, основой которой является единая системная концепция. Это позволяет совмещать в общих моделях математическое описание разнородных свойств объектов и процессов их функционирования.

Проблема унификации знаний всегда находилась в поле внимания ученых, создававших основы методологии, теоретические методы, математические модели и процедуры исследования естественных явлений природы и артефактов различной сложности. Первыми опубликованными работами в области унификации концептуальных моделей сложных объектов считаются труды А.А. Богданова [13] и Л. фон Берталанфи [14]. По мере развития техники формировались теоретические базы системного подхода, системотехники и общей теории систем, объединенные методологией кибернетики. Важным конструктивным подходом к ис-

следованию сложных объектов явилась концепция «управляющей системы», предложенная С.В. Яблонским для описания «физических систем» [15] и наиболее близко отражающая стремление к унификации моделей сложных объектов. В дальнейшем эта концепция была дополнена за счет включения в нее объектов управления, виртуальных систем и специального кодирования функций элементов [16]. Функционирование таких систем представляется как передача вещественных, энергетических и информационных потоков от входов к выходам с преобразованием управляемых свойств потоков в процессе передачи. Таким образом, концепция системы распределения и преобразования потоков (СРПП) является унифицированной моделью для исследования структурно-функциональных свойств систем с разнородными элементами произвольной физической природы. Именно это свойство концептуальной модели позволяет проводить исследования совместно функционирующих разнородных систем, влияющих на развитие и последствия нештатных ситуаций.

Применительно к КЗ используется двухуровневая иерархическая модель СРПП, типовый вариант функциональной структуры которой показан на рис. 1.

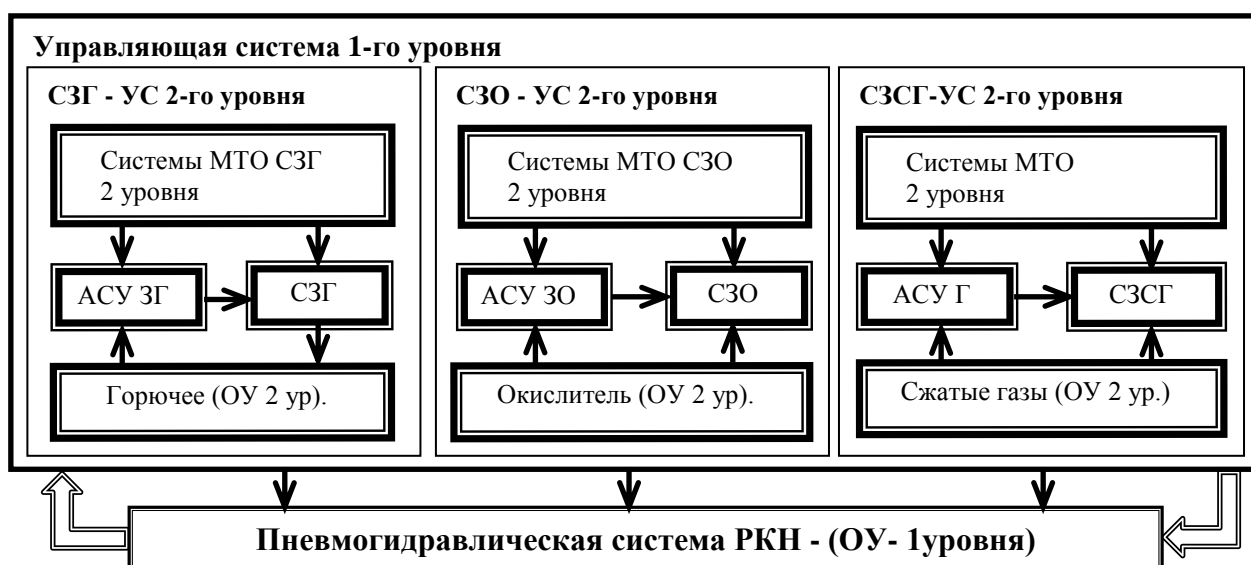


Рис. 1. Схема функциональной структуры КЗ как двухуровневой системы распределения и преобразования потоков (СРПП):

СЗГ – система заправки горючим; СЗО – система заправки окислителем; СЗСГ – система заправки сжатыми газами; МТО – материально-техническое обеспечение; АСУ – автоматизированная система управления; УС – управляющая система; ОУ – объект управления

Приведенная модель представляет собой с кибернетической точки зрения систему управления, включающую трехэлементную управляющую систему 1-го уровня (КЗ) и объект управления 1-го уровня (РКН). Комплекс заправки оказывает управляющее воздействие на РКН, переводя ее из незаправленного состояния в заправленное. Элементами управляющей системы 1-го уровня являются управляющие системы 2-го уровня: система заправки горючим (СЗГ), система заправки окислителем (СЗО), система заправки сжатыми газами (СЗСГ), а соответствующими им объектами управления 2-го уровня являются соответственно компоненты топлива и сжатых газов. Состояние объекта управления 1-го уровня соответствует агрегированным состояниям элементов 2-го уровня, т. е. РКН, как объект управления, переходит в состояние готовности к пуску (в части заправки), если параметры свойства компонентов ракетного топлива находятся в заданных диапазонах, а сами компоненты перемещены в топливные баки и баллоны РКН.

КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ

Для проектных исследований функциональной структуры КЗ, режимов и алгоритмов функционирования будем использовать унифицированный комплекс алгоритмически взаимосвязанных моделей, процедур и характеристик [17] (рис. 2). В нем отражены модели и процедуры упомянутых выше исследований, а также алгоритмические связи, образующие двухуровневое описание объекта исследований (уровень системы и уровень элементов).

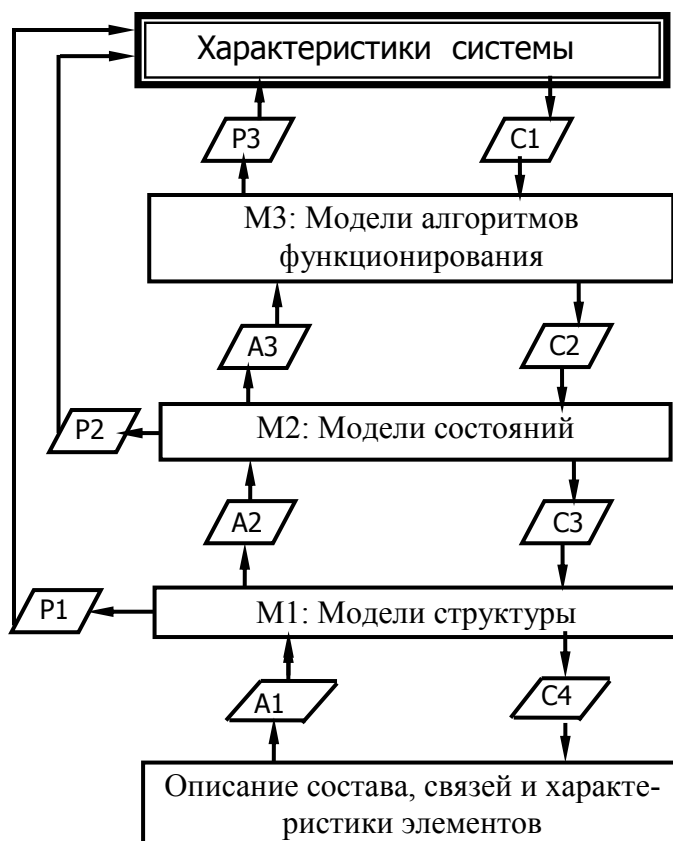


Рис. 2. Комплекс моделей

В комплекс входят следующие компоненты:

- описание состава и связей (схема), а также состояний и характеристик элементов;
- модели М1 функциональной структуры;
- модели М2 состояний (режимов) системы;
- модели М3 алгоритмов функционирования;
- процедуры структурно-функционального анализа: А1 (формализация структуры), А2 (определение множества состояний системы), А3 (построение алгоритмов функционирования систем по моделям состояний и переходов);
- процедуры синтеза функциональной структуры: С1 (формализация исходных данных в виде заданных алгоритмов функционирования), С2 (декомпозиция алгоритмов функционирования на множество состояний), С3 (декомпозиция моделей функций системы на функции элементов с сохранением связей);
- процедуры Р1, Р2, Р3 расчета показателей системы по соответствующим моделям.

Приведенные модели подробно описаны в специализированной литературе [18]. В рамках этой комплексной схемы исследований, как видно из приведенных выше процедур, решаются две основные группы задач – анализа функциональной структуры (агрегативный переход снизу вверх по схеме, показанной на рис. 2, – от схемы и характеристик элементов к моделям

и характеристикам алгоритмов функционирования) и синтеза функциональной структуры (декомпозиционный переход сверху вниз по схеме, изображенной на рис. 2, – от заданных характеристик системы и алгоритмов функционирования к множеству функциональных элементов и их связей).

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ СИСТЕМ КОМПЛЕКСА ЗАПРАВКИ

Представленный комплекс моделей является основой для формулировки и решения задач моделирования функционирования СРПП для принятия решений на управление в нештатных условиях эксплуатации средствами систем поддержки принятия решений. Схема методики проведения такого анализа показана на рис. 3.

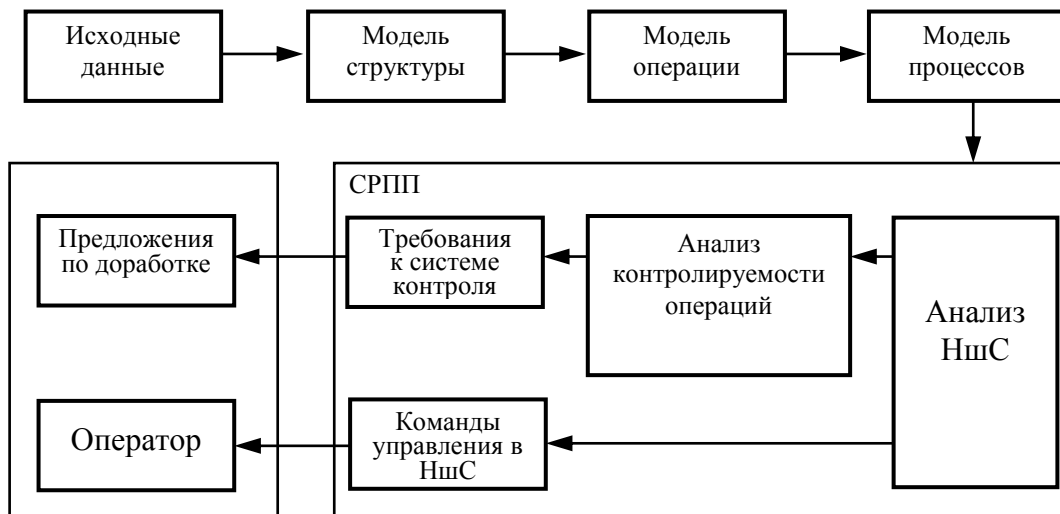


Рис. 3. Схема методики моделирования и анализа нештатных ситуаций

Поясним приведенные модели и процедуры простым примером гипотетической системы заправки, схема которой изображена на рис. 4,а, а соответствующая диаграмма графа – на рис. 4,б.

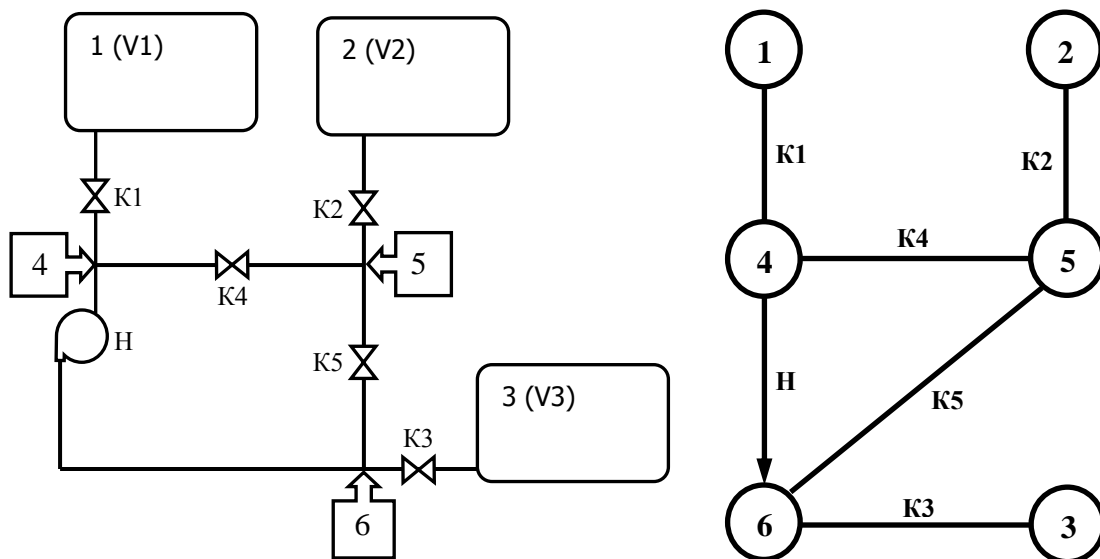


Рис. 4. Модели и процедуры системы заправки:

а – схема гидросистемы; б – диаграмма графа структуры гидросистемы

В множестве вершин графа $G(V, X)$ (где V – множество вершин, X – множество ребер) выделяется подмножество *терминальных вершин* (на рис. 4,б – вершины 1, 2, 3, соответствующие емкостям). Терминальные вершины соответствуют входам и выходам для потоков рабочей среды (РС), в них начинаются и заканчиваются пути передачи РС в системе. Остальные вершины – промежуточные (на рис. 4,б – вершины 4, 5, 6 соответствуют коллекторам 4, 5, 6).

Для автоматизации процедур анализа используются матричные (рис. 5,а) и табличные (рис. 5,б) формы записи моделей структуры.

	1	2	3	4	5	6
1				K1		
2					K2	
3						K3
4	K1				K4	H
5		K2		K4		K5
6			K3		K5	

а)

1	4
2	5
3	6
4	1,5,6
5	2,4,6
6	3,5

б)

Рис. 5. Модели структуры:
а – матрица связей вершин; б – таблица связей

Для математического описания в моделях операций функций операций и преобразований свойств РС используются структурно-логические формулы (СЛФ) путей графа структуры, получаемые по известным алгоритмам [18]. В них элементы, входящие в состав пути, представляются как логические переменные, принимающие значения булевых переменных, а для описания преобразований свойств потоков применяются коды Геделя [18], если элемент изменяет свойства РС. Множество операций может быть представлено матрицей, строки и столбцы которой соответствуют терминальным вершинам-источникам. Элементы матрицы содержат СЛФ при передаче от вершины-источника v_i к вершине-потребителю v_j . Матрица операций для примера приведена на рис. 6.

	v_1	v_2	v_3
v_1	–	$K1 \wedge K4 \wedge K2 \vee$ $K1 \wedge H \wedge K5 \wedge K2$	$K1 \wedge H \wedge K3 \vee$ $K1 \wedge K4 \wedge K5 \wedge K3$
v_2	$K2 \wedge K4 \wedge K1$	–	$K2 \wedge K4 \wedge H \wedge K3 \vee$ $K2 \wedge K5 \wedge K3$
v_3	$K3 \wedge K5 \wedge K4 \wedge K1$	$K3 \wedge K5 \wedge K2$	–

Рис. 6. Матрица операций:
 \wedge – символ конъюнкции; \vee – символ дизъюнкции

Функционирование систем состоит в выполнении последовательности операций, определенных алгоритмом управления и описывается известными в теории конечных автоматов графами переходов, в которых вершины соответствуют операциям (состояниям), а дуги – СЛФ переходам между состояниями.

Однако в процессе функционирования, при переходах от одной операции к другой, возможны переходы элементов в нештатные состояния и как следствие переходы в нештатные состояния всей системы. В связи с этим возникает необходимость определения алгоритмов управления, для того чтобы вывести исследуемый объект в работоспособное или нерабочее состояние в случаях отклонений от штатного функционирования.

Для описания нештатного функционирования используется модель в виде дерева функционирования. Фрагмент дерева функционирования для рассматриваемого примера показан на рис. 7.

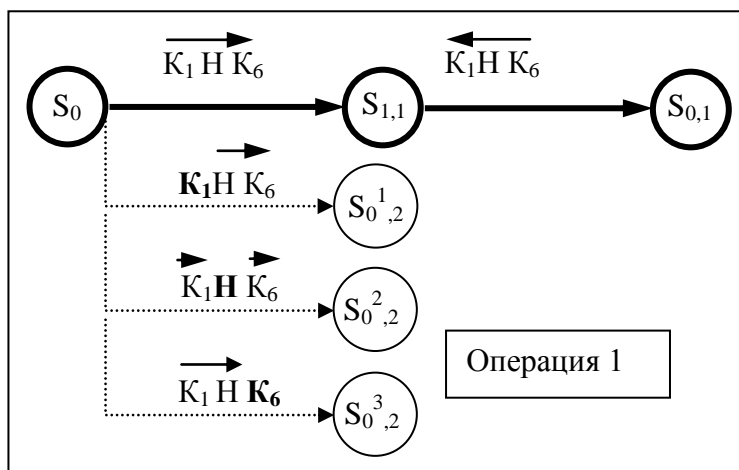


Рис. 7. Дерево нештатного функционирования

В качестве корневой вершины дерева выступает исходное состояние. Безотказное выполнение алгоритма функционирования описывается «стволом» дерева функционирования, являющегося путем штатного функционирования.

Для описания отклонений от штатного функционирования производится ветвление ствола дерева в каждом такте функционирования, т. е. из каждого штатного состояния.

Полученная модель является основой для принятия решений по управлению в нештатных состояниях. При этом целесообразно использовать резервные пути управления. При формировании таких путей дополняется модель функционирования алгоритмами *нештатных* режимов управления, которые и используются в системах поддержки принятия решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика моделирования нештатных условий функционирования рекомендуется для включения в программу обеспечения надежности системы, для проведения анализа в рамках программы обеспечения надежности и безопасности функционирования в отношении вновь создаваемых систем.

Результаты анализа могут быть использованы непосредственно для формирования требований к системам контроля, диагностирования, управления, а также для специальных систем обеспечения безопасности.

Положения приведенной методики целесообразно использовать при создании тренажерно-моделирующих комплексов подготовки персонала к управлению в нештатных ситуациях по аналогии с подготовкой летного персонала в авиационных и транспортных подразделениях.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 26 с.
2. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 12 с.
3. ГОСТ 12.0.002-2014. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
4. ГОСТ 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 26 с.
5. ГОСТ Р 54317-2011. Комплексы стартовые и технические ракетно-космических комплексов. Требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2011. – 28 с.
6. *Аверкиев Н.Ф., Гранкин Б.К., Козлов В.В.* Нештатные состояния и нештатные ситуации в системах технологических комплексов национального значения // *Фундаментальные исследования и инновации в национальных и исследовательских университетах: материалы XIV Всероссийской конференции 12-13 мая 2011.* – СПб.: СПб ГПУ, 2011. – С. 120–124.
7. *Петухов Г.Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – МО СССР, 1989. – Ч.1: Методология, методы, модели. – 660 с.
8. ГОСТ Р 31010-2011 (ИСО/МЭК). Менеджмент риска. Методы оценки риска. – М.: Стандартинформ, 2012. – 70 с.
9. *Голиков И.О., Гранкин Б.К.* Структурные методы проектирования агрегатов технологического оборудования. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1994. – 145 с.
10. ГОСТ 34.602-89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. – М.: Стандартинформ, 2009. – 12 с.
11. Методология обеспечения безопасности стартовых комплексов: монография / *А.Г. Гончар, Б.К. Гранкин, В.В. Козлов, В.И. Смирнов, А.В. Федоров, В.С. Шарапов* // М.: Поиск, 2008. – 406 с.
12. ГОСТ 25866-83 Эксплуатация техники. Термины и определения. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 8 с.
13. *Богданов А. А.* Тектология. Всеобщая организационная наука. – М.: Экономика, 1989. – Кн. 1. – 304 с.; кн. 2 – 351 с.
14. *Берталанфи Л. фон.* Общая теория систем – обзор проблем и результатов. Системные исследования: ежегодник. – М.: Наука, 1969. – С. 30–54.
15. *Яблонский С.В.* Основные понятия кибернетики // *Проблемы кибернетики.* – 1959. – Вып. 2.
16. *Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В.* Синтез функциональной структуры систем потокораспределения в технологическом оборудовании ракетно-космической техники // *Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации».* – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т.1. – С. 94–99.
17. *Гранкин Б.К., Козлов В.В.* Комплекс моделей и задачи проектных исследований систем потокораспределения. Актуальные проблемы защиты и безопасности // *Труды 14-й Всероссийской НПК РАРАН (4-7 апреля 2011 г.). Вооружение и военная техника.* – СПб., 2011. – Т.1.
18. *Степанов М.И., Воробьев А.М., Гранкин Б.К.* Комплексы заправки ракет и космических аппаратов. – СПб.: Русло, 2002. – 463 с.
19. *Лежнев А.В.* Динамическое программирование в экономических задачах. – М., 2010. – 176 с.

Р.А. Гудаев;
В.О. Королев,
кандидат техн. наук, доцент;
Д.А. Рогов,
кандидат техн. наук, доцент;
С.Е. Шалдаев,
доктор техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Предложена математическая модель функционирования системы распознавания. Применение рассматриваемой модели позволит решать задачи, связанные с построением систем распознавания и определения необходимого количества признаков.

Ключевые слова: модель, распознавание, признаки, энтропия.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач системы контроля и мониторинга деятельности иностранных государств в околоземном космическом пространстве является задача распознавания. На данный момент в ряде работ предпринимаются попытки по расширению признакового пространства и совершенствованию научно-методического аппарата распознавания. Эти работы направлены на улучшение системных показателей, в частности – вероятности правильного распознавания. Для того чтобы определить, насколько изменилась данная величина, в зависимости от различных факторов применяют методы математического моделирования функционирования системы, а также лабораторные и натурные эксперименты. Использование последних сопряжено с определенными трудностями, особенно когда речь идет о сложной динамической системе контроля и мониторинга деятельности иностранных государств в околоземном космическом пространстве, средства измерений которой имеют широкую географию расположения и отличаются различными особенностями функционирования. Для оценивания основных показателей системы распознавания и обеспечения возможности оптимального выбора привлекаемых средств измерения параметров распознаваемых объектов предлагается разработать модель функционирования системы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо усовершенствовать существующую математическую модель функционирования системы распознавания с целью повышения качества решения задачи по распознаванию объектов на основе оптимального применения информационных ресурсов, получаемых от информационных средств измерений системы контроля и мониторинга деятельности иностранных государств в околоземном космическом пространстве при заданных условиях:

$$P_{\text{достиг}} \geq P_{\text{треб}}, \text{ при } P_{\text{достиг}} = \max P(N, M, C_n^m, P^{\text{опт}}),$$

где N – количество признаков распознавания, $n = 1, 2, \dots, N$;
 M – количество классов распознавания, $m = 1, 2, \dots, M$;
 C_n^m – вектор весовых коэффициентов;

$P^{\text{ош}}$ – вероятность ошибок распознавания;

$P_{\text{треб}}$ – вероятность правильного распознавания, определяемая приказом МО РФ.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Для оценки эффективности системы распознавания воспользуемся методом статистических испытаний [3] с применением математического моделирования. Структурная схема математической модели функционирования системы распознавания показана на рис. 1.

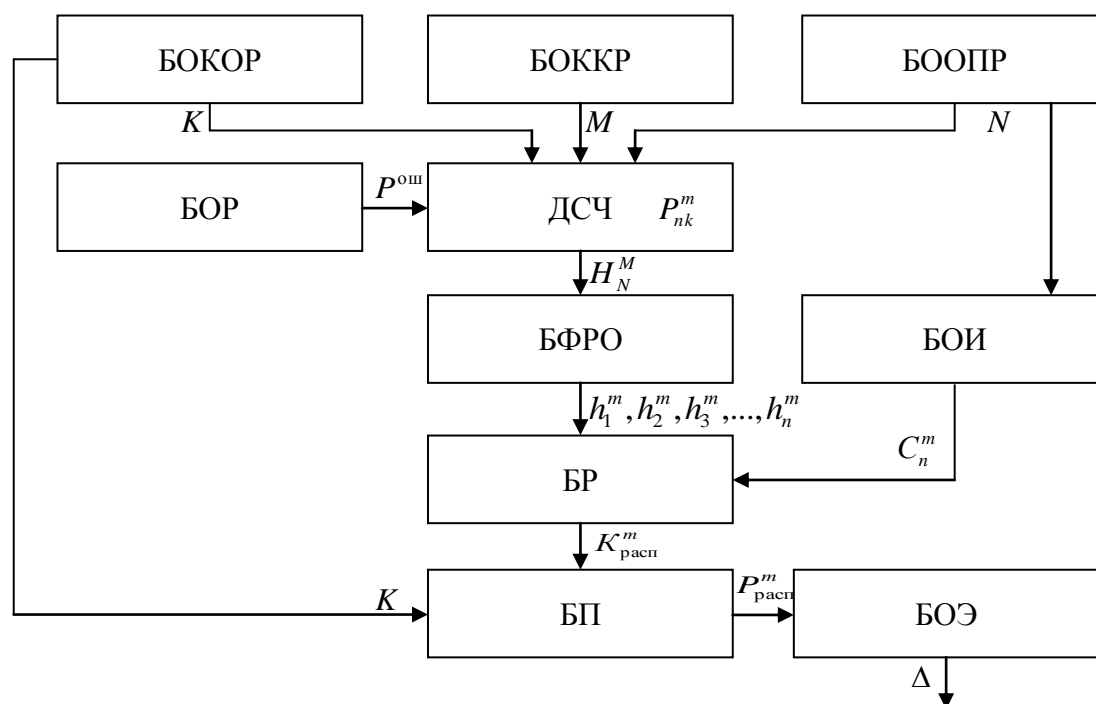


Рис. 1. Структурная схема математической модели функционирования системы распознавания

На рисунке введены обозначения: БООПР – блок определения объема признаков распознавания; БФРО – блок формирования распознаваемых объектов; БОКОР – блок определения количества объектов распознавания; БОККР – блок определения количества классов распознавания; БОР – блок ошибок распознавания; БР – блок распознавания; БОИ – блок определения информативности; БП – блок подсчета; БОЭ – блок оценки эффективности; ДСЧ – датчик случайных чисел, в котором генерируются случайные числа в соответствии с биномиальным законом распределения и вероятностью, соответствующей вероятности правильного распознавания на основании соответствующего признака.

ПРИНЦИП РАБОТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

После того как оператор задал исходные данные, для проведения каждого распознавания с помощью ДСЧ формируется модель объекта распознавания (количество данных объектов обозначается величиной K), принадлежность к определенному классу заранее известна. Вероятности правильного распознавания соответствующего класса P_n^m ($m=1,2,\dots,M$) на ос-

новании определенного признака ($n = 1, 2, \dots, N$) хранятся в блоке БФРО или задаются оператором. Формирование объекта распознавания производится заданием совокупности решений о распознавании на основании соответствующего признака, которые имеют следующий вид: $h_1^m, h_2^m, h_3^m, \dots, h_N^m$, где h_n^m принимает значение 1, если объект распознан на основании данного признака и 0 – в противном случае. Каждый объект распознавания класса Ω_m представляет собой многомерную случайную величину с заданным законом распределения. Таким образом, для k -го количества ситуаций распознавания по n -му количеству признаков m -го класса распознавания будет получена следующая матрица размерностью $K \times N$:

$$H'_{nk} = \begin{pmatrix} h'_{11} & h'_{12} & \dots & h'_{1N} \\ h'_{21} & h'_{22} & \dots & h'_{2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ h'_{K1} & h'_{K2} & \dots & h'_{KN} \end{pmatrix}, n=1,2,\dots,N, k=1,2,\dots,K,$$

где K – количество распознаваемых объектов, $k = 1, 2, \dots, K$.

Числовые значения $h_1^m, h_2^m, h_3^m, \dots, h_N^m$ подвергаются случайному искажению (в зависимости от величины вероятности ошибки распознавания $P^{\text{ош}}$). Это имитирует различные ошибки в процессе распознавания на основании признаков, полученных с использованием измерительных средств, имеющих различные точностные характеристики. Для этого сформируем следующую матрицу ошибок:

$$P_{nk}^{\text{ош}} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ p_{K1} & p_{K2} & \dots & p_{KN} \end{pmatrix}, n=1,2,\dots,N, k=1,2,\dots,K.$$

Элементы данной матрицы p_{kn} принимают значение либо 1 в случае, если имела место ошибка распознавания, либо 0 – в противном случае. Далее производится вычитание из элементов матрицы H'_{nk} элементов матрицы $P_{nk}^{\text{ош}}$:

$$H_{nk} = H'_{nk} - P_{nk}^{\text{ош}} = \begin{pmatrix} h'_{11} & h'_{12} & \dots & h'_{1N} \\ h'_{21} & h'_{22} & \dots & h'_{2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ h'_{K1} & h'_{K2} & \dots & h'_{KN} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ p_{K1} & p_{K2} & \dots & p_{KN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ h_{K1} & h_{K2} & \dots & h_{KN} \end{pmatrix}.$$

Элементы результирующей матрицы H_{nk} , взятые по модулю, будут имитировать k -е количество ситуаций распознавания m -го класса по n -му количеству признаков при условии наличия ошибок распознавания.

Искаженные объекты распознавания поступают на вход БР, в котором принимается решение о распознавании объекта на основании совокупности признаков. Правило принятия решения в БР относительно истинности той или иной гипотезы формулируется следующим образом:

– если значение $G_{\text{расп}}^m$ удовлетворяет условию $G_{\text{расп}}^m > g_{\text{опт}}$, то справедлива гипотеза Γ_0 , т. е. объект принадлежит данному классу;

– если значение $G_{\text{расп}}^m$ удовлетворяет условию $G_{\text{расп}}^m \leq g_{\text{опт}}$, то справедлива гипотеза Γ_1 , т. е. объект не принадлежит данному классу.

Величина $G_{\text{расп}}^m$ находится по следующей формуле:

$$G_{\text{расп}}^m = h_{k1}^m c_1^m + h_{k2}^m c_2^m + h_{k3}^m c_3^m + \dots + h_{kN}^m c_N^m, \quad k=1,2,\dots,K, \quad m=1,2,\dots,M. \quad (1)$$

В свою очередь, критериальное значение определяется следующим образом: $g_{\text{опт}} = n_{\text{опт}} \cdot C = n_{\text{опт}} \cdot \frac{1}{N}$, где C – значение весовых коэффициентов без определения информативности. В противном случае весовые коэффициенты c_n^m предлагается назначать исходя из разделяющих качеств признаков распознавания. В работе [5] под признаками, обладающими «хорошими» разделяющими качествами, т. е. информативными, следует понимать признаки, которые уменьшают неопределенность заданной ситуации распознавания. В свою очередь, мерой статистической неопределенности является энтропия \mathcal{E} [3, 6].

Применительно к данной ситуации и исходя из вышеуказанных работ энтропию предлагается рассчитывать следующим образом:

$$\mathcal{E}_n^m = -P_n^m \log P_n^m, \quad n=1,2,\dots,N, \quad m=1,2,\dots,M, \quad (2)$$

где P_n^m – вероятности правильного распознавания типа объекта на основании единичного признака.

Результатом проведенных по формуле (2) расчетов будут $N \times M$ значений энтропии. В соответствии с идеей, рассмотренной в работах [5, 6], будем полагать более информативным признак, когда соответствующее значение энтропии \mathcal{E}_n^m принимает минимальное значение.

Весовые коэффициенты предлагается назначить относительно минимального значения энтропии $c_n^m = \frac{\min \mathcal{E}_n^m}{\mathcal{E}_n^m}$ с последующим нормированием (в масштабах определенного класса распознавания). Таким образом, нормированные весовые коэффициенты будут рассчитываться по следующей формуле:

$$c_n^m = \frac{c_n^m \cdot 100}{\sum_{w=1}^W c_n^m}, \quad n=1,2,\dots,N, \quad m=1,2,\dots,M. \quad (3)$$

В свою очередь, для каждого значения N , исходя из анализа работ [1, 7], без потери общности можно рассчитать оптимальное значение $n_{\text{опт}}$:

$$n_{\text{опт}} = a\sqrt{N}, \quad (4)$$

где a – величина, определяющая пороговое значение (определяется эмпирически или экспертно, в указанных работах данное значение принимается равным $a = 1,5$).

При распознавании объектов m -го класса оценкой вероятности правильного решения служит отношение количества правильных ответов $K_{\text{расп}}^m$ к общему числу K , т. е. $p_m \approx K_{\text{расп}}^m / K$.

После проведения расчетов, представленных выше, будет получено M вероятностей правильного распознавания соответствующих классов. Для расчета вероятности распознавания

M классов, т. е. вероятности распознавания системы, воспользуемся формулой *полной вероятности* [2]. Под событием A в данном случае будем полагать факт распознавания объекта одного из M классов:

$$\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_M,$$

образующих полную группу несовместных событий. В таком случае вероятность распознавания (события A) вычисляется как сумма произведений вероятности распознавания p_m на вероятность события при этой гипотезе $P(A | \Omega_m)$:

$$P(A) = \sum_{m=1}^M p_m \cdot P(A | \Omega_m), \quad m=1,2,\dots,M. \quad (5)$$

Априорные вероятности $P(A | \Omega_m)$ могут быть рассчитаны как отношение количества объектов распознавания l_m класса к общему числу объектов L , которые находятся в зоне действия комплекса измерений.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Рассмотренная математическая модель позволяет найти зависимость $P(A)$ от количества признаков распознавания и классов распознавания, применения весовых коэффициентов, рассчитанных на основе энтропийного подхода [5, 6] и влияния различных ошибок на процесс измерения и распознавания, т. е. $P(A) = P(N, M, C_n^m, P^{out})$.

В БОЭ хранятся значения вероятности правильного распознавания с обозначением условий, при которых они были рассчитаны. Знак (\pm) и величина разности между измеренным значением и хранящимся в памяти $\Delta = P'(N', M', C_n^m, P^{out}) - P(N, M, C_n^l, P^{out})$ будут отражать эффективность системы распознавания ($m \neq l, l=1,2,\dots,M, v \neq n, v=1,2,\dots,N$). Содержащиеся в этом равенстве сведения являются исходными данными для задач об определении состава технических средств измерений, необходимого для формирования признакового пространства (т. е. количества признаков N), обеспечивающего решение задачи распознавания с заданными показателями качества.

Для получения конкретного признака необходимо провести ряд мероприятий, которые в конечном счете обладают своими требованиями по времени и стоимости. Большой объем указанных ресурсов, потраченных на получение конкретного признака, вовсе не гарантирует того, что он, в свою очередь, будет обладать высокой информативностью. В данной ситуации логичным будет оценить целесообразность получения этого признака. Данную оценку возможно провести на основании рассмотренной модели, поставив в соответствие каждому признаку, участвующему в распознавании, определенный коэффициент, отражающий затраты на его получение. В этом случае процесс распознавания можно оптимизировать с точки зрения вычислительных затрат [3].

В табл. 1 приведены результаты расчетов энтропии и весовых коэффициентов, найденных для соответствующих статистических вероятностей правильного распознавания типа объекта ($N=10, K=500, M=1$).

Анализ результатов показал, что применение весовых коэффициентов, рассчитанных на основании энтропийного подхода, позволило увеличить вероятность правильного распознавания (в данной ситуации) на $\Delta = P'(10,1,c_n^1,0) - P(10,1,c,0) = 13,6\%$.

Таблица 1

Сводная таблица результатов расчетов весовых коэффициентов

Название	Значения										
	P_n^1	0,913	0,8	0,75	0,7	0,6	0,65	0,62	0,4	0,5	0,45
\mathcal{E}_n^1	0,083	0,178	0,215	0,249	0,306	0,280	0,296	0,366	0,346	0,359	
c_n^1	0,268	0,124	0,103	0,089	0,072	0,079	0,075	0,06	0,064	0,062	
Количество правильных распознаваний без учета информативности (C)									222 (44,4%)		
Количество правильных распознаваний с учетом информативности (c_n^1)									290 (58%)		

На рис. 2. показана диаграмма изменения соотношений вероятностей распознавания в зависимости от количества используемых признаков распознавания и применения весовых коэффициентов, рассчитанных на основании энтропийного подхода.

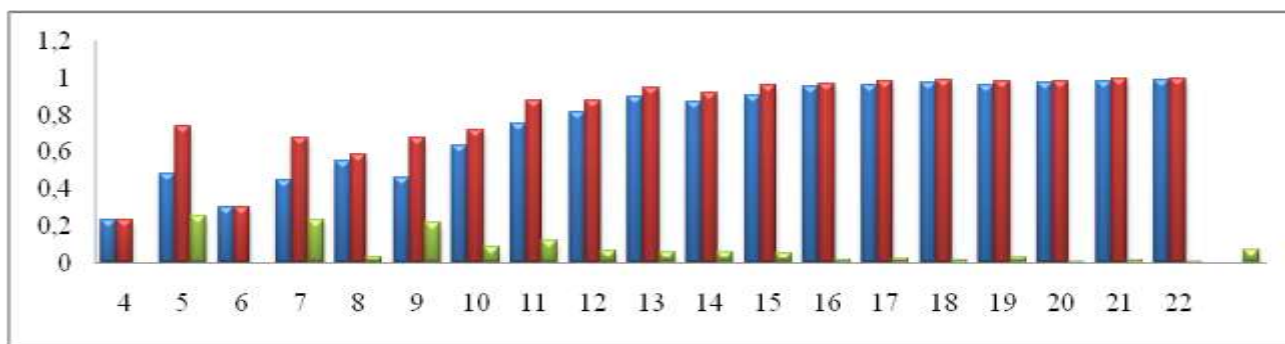


Рис. 2. Диаграмма изменения соотношений вероятностей распознавания

Анализ представленных данных показывает, что применение весовых коэффициентов и расширение признакового пространства приводит к увеличению вероятности правильного распознавания. Среднее значение Δ составило порядка 6%. Расчеты производились при следующих исходных данных: $n = 4 \dots 22$, $K = 1000$, $M = 1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствованная математическая модель функционирования системы распознавания, предлагаемая в этой работе, позволяет решить следующие задачи:

- рассчитать вероятности распознавания системы;
- определить эффективность системы распознавания;
- определить оптимальный набор признаков, обеспечивающих требуемое значение вероятности, при минимальных значениях используемых ресурсов;
- определить степень влияния на процесс распознавания весовых коэффициентов, рассчитанных на основании энтропийного подхода;
- определить степень влияния ошибок на вероятность распознавания.

Список используемых источников

1. Васин В.В., Степанов Б.М. Справочник-задачник по радиолокации. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

3. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. Современное состояние проблемы распознавания. – М.: Радио и связь, 1985. – 160 с.
4. Журавлёв Ю.И. Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение. – М.: Наука, 1992. – 320 с.
5. ТуДж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов / перевод с англ. И.Б. Гуревича; под общ. ред. Ю.И. Журавлева. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
6. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / под общ. ред. Р.Л. Добрушина, О.Б. Лупанова. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 823 с.
7. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин, Г.А. Костин, В.Н. Манжос, Н.Н. Минервин, Б.В. Найдёнов, В.И. Поляков, А.С. Челпанов; под общ. ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.

С.Ю. Королев;
И.В. Фоминов,
доктор техн. наук

АЛГОРИТМ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА-РОБОТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОБЛЕТА ОРБИТАЛЬНОГО ОБЪЕКТА

В работе рассматривается теоретический подход к решению актуальной задачи обеспечения начальной выставки космического аппарата-робота для выполнения облета с целью диагностирования технического состояния орбитального объекта. Предлагается алгоритм определения относительных параметров навигации и управления движением в процессе начальной выставки космического аппарата-робота, основанный на использовании как традиционных измерителей, так и оптико-электронной камеры, установленной на борту космического аппарата-робота.

Ключевые слова: космический аппарат-робот, облет орбитального объекта, начальная выставка.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач обслуживания орбитальных объектов (ОО) является диагностирование их технического состояния. Эта задача может выполняться космическим аппаратом-роботом (КАР) путем получения фотоизображений обслуживаемого ОО в процессе его облета. С наименьшими энергетическими затратами реализуется пассивный облет, который осуществляется за один виток посредством углового сопровождения ОО. Выполнение режима облета возможно после того, как КАР займет исходное положение на предполагаемой траектории облета. Оптимальным с точки зрения достижения заданной точности начальной выставки КАР является выбор положения его центра масс (ЦМ) на линии, соединяющей центр Земли и ЦМ ОО. При этом ось визирования КАР должна быть совмещена с требуемой точностью с линией, соединяющей центры масс КАР и ОО. Очевидно, что существуют только две точки на предполагаемой траектории, отвечающие заданным требованиям. Настоящая статья посвящена разработке алгоритма начальной выставки КАР в точке, расположенной между ОО и Землей. При таком расположении обеспечивается одновременное определение как относительных параметров движения КАР, так и углового положения в орбитальной системе координат (ОСК). В настоящее время этот вопрос в периодических изданиях практически не рассматривается. В следствие этого представляется актуальным разработка алгоритма начальной выставки КАР.

АЛГОРИТМ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА-РОБОТА

Для решения задачи группового полета КАР [1] принято рассматривать движение его центра масс в относительной системе координат $(OX_{\text{Отн}} Y_{\text{Отн}} Z_{\text{Отн}})$, начало которой расположено в ЦМ ОО, ось $X_{\text{Отн}}$ направлена по касательной к круговой орбите ОО, ось $Y_{\text{Отн}}$ направлена по радиусу-вектору из центра Земли через ЦМ ОО, ось $Z_{\text{Отн}}$ дополняет систему координат до правой тройки векторов (рис. 1,а). Угловое положение КАР определяется в визирной системе координат (ВСК) $(OX_{\text{В}} Y_{\text{В}} Z_{\text{В}})$, начало которой расположено в центре масс КАР, ось $Y_{\text{В}}$ проходит через ЦМ ОО, ось $Z_{\text{В}}$ перпендикулярна плоскости облета, ось $X_{\text{В}}$ дополняет систему координат до правой тройки векторов (рис. 1,а).

Таким образом, во время выполнения облета ВСК совершает вращательное движение вокруг OO , и задача управления угловым движением КАР сводится к задаче постоянного совмещения связанной системы координат (ССК) КАР с ВСК.

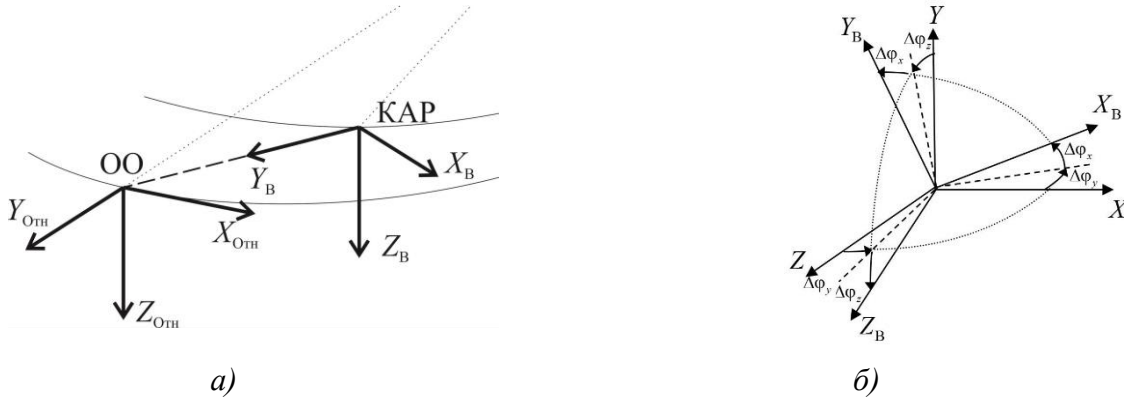


Рис. 1. Системы координат:
 а – относительная и визирная системы координат;
 б – связанная и визирная системы координат

Отклонение ВСК относительно ССК определяется углами (рис. 1,б):

$$\Delta\varphi_x, \Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z.$$

Предполагается, что КАР предварительно ориентирован в ОСК и находится в окрестности OO в положении 1 в соответствии с рис. 2. При этом ось визирования ОЭК совпадает с осью Y ОСК.

Требуемое положение КАР для выполнения облета соответствует положению 2 на рис. 2. Для достижения этого положения после выведения КАР в заданную окрестность OO необходимо совместить линии, соединяющие центр Земли ЦМ OO и ЦМ КАР.

Точность размещения КАР при начальной выставке имеет существенное влияние на траекторию относительного движения КАР во время выполнения облета, которая, в свою очередь, определяет возможность функционирования ОЭК КАР и качество получаемых изображений. Необходимость проведения начальной выставки обусловлена наличием погрешности определения параметров движения OO наземными средствами, а также погрешностью выведения КАР.

Существо алгоритма начальной выставки КАР заключается в выполнении ряда типовых операций.

1. В случае, если после выполнения орбитальной ориентации КАР, то есть совмещения его ССК с ОСК, наблюдаемый OO не попадает в поле зрения ОЭК ($\Delta\varphi_i > \varphi_{\text{пз}} / 2$, $i \in \{x, y, z\}$), необходимо осуществить поиск OO путем реализации метода конического сканирования.

Если $\Delta\varphi_i \leq \varphi_{\text{пз}} / 2$, то по информации с ОЭК определяется угол рыскания $\psi(t)$ по формуле

$$\Delta\psi(t) = \arctg \frac{\Delta\tilde{z}(t)}{\Delta\tilde{x}(t)}, \quad (1)$$

где $\Delta\tilde{x}$, $\Delta\tilde{z}$ – смещения на ПЗС-матрице ОЭК центра изображения OO (рис. 3).

2. По информации с ОЭК формируется приборный визирный базис $\mathbf{P}_{\text{оэж}}$ путем задания его начального углового положения относительно связанного базиса \mathbf{E} (рис. 4):

$$\mathbf{\Lambda}_{\text{оэж}}(t_0) = \mathbf{\Lambda}_a(t_k), \quad (2)$$

где $\Lambda_a(t_k)$ – кватернион углового рассогласования связанного базиса E относительно инерциального базиса I , определяемый на момент времени t_k звездным датчиком.

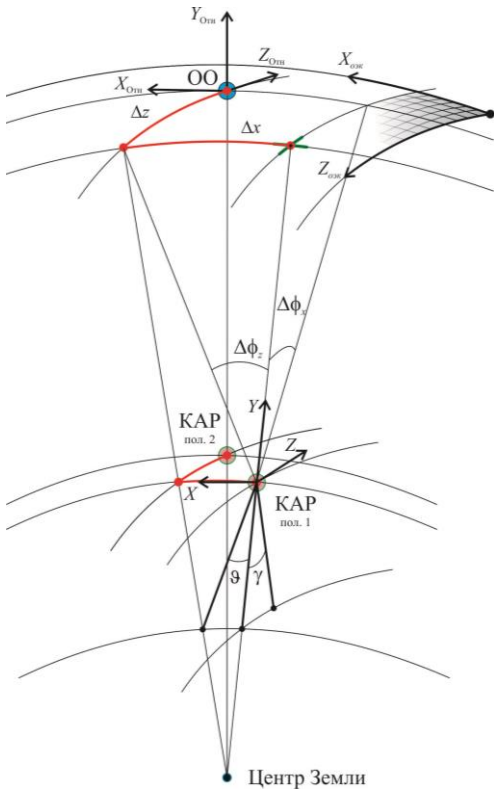


Рис. 2. Взаимное расположение КАР и ОО при выполнении начальной выставки

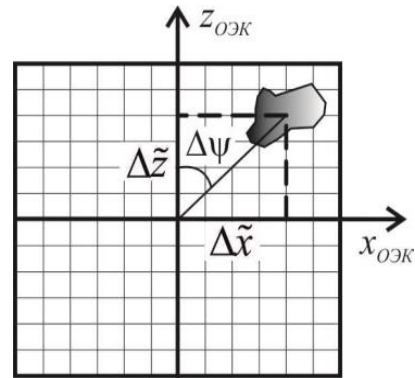


Рис. 3. Изображение ОО на ПЗС-матрице ОЭК

3. Моделируется движение приборного визирного базиса для совмещения его с визирным базисом с помощью задания угловых скоростей коррекций:

$$\begin{cases} \Omega_{ky}(t) = k_y(\Delta\psi(t) - 2v_0v_1); \\ \Omega_{kz}(t) = k_z(\Delta\tilde{z}(t) - 2v_0v_3), \end{cases} \quad (3)$$

$$\dot{\Lambda}_{OZK}(t) = \frac{1}{2} \Lambda_{OZK}(t_0) \circ \Omega_k dt. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) символами v_0, v_1, v_2, v_3 обозначены компоненты кватерниона N рассогласования связанного базиса E относительно приборного визирного P_{OZK} (рис. 4); k_y, k_z – коэффициенты пропорциональности, $k_y > 0, k_z > 0$; Ω_k – кватернионное отображение вектора угловой скорости коррекции, $\Omega_k = [0, 0, \Omega_{ky}, \Omega_{kz}]^T$.

Моделирование приборного визирного базиса P_{OZK} является кинематической задачей ориентации КАР относительно ВСК.

4. Для решения динамической задачи, заключающейся в физическом совмещении связанного базиса E с приборным визирным базисом P_{OZK} , необходимо сформировать управляющий момент следующего вида:

$$M_i^{уп} = k_i v_0 v_i + k_\omega \omega_i, \quad (5)$$

где ω_i – компоненты вектора угловой скорости вращения КА относительно инерциального пространства.

Введение производной в выражение (5) обусловлено необходимостью обеспечения устойчивости углового движения КАР в подвижной системе координат [2].

Признаком начала решения кинематической задачи ориентации является завершение динамической задачи:

$$v_i \leq \Delta v_{доп}.$$

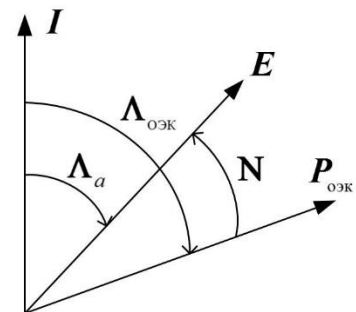


Рис. 4. Взаимное рассогласование инерциального I , связанного E и приборного P_{OZK} базисов

Таким образом, задача ориентации КАР относительно оси визирования решается путем выполнения как кинематической, так и динамической задач ориентации.

5. После приведения ССК КАР к осям OX_B и OY_B ВСК начинается процесс управления вектором относительного положения ρ посредством включения корректирующей двигательной установки (КДУ) вдоль оси OX ССК и выполнение углового разворота вокруг оси OZ ССК с целью совмещения вектора ρ с линией, соединяющей ЦМ ОО и ЦМ Земли.

Для решения такой задачи необходимо выдать импульс скорости ΔV_p для разгона КАР. При этом центр изображения ОО закономерно сместится относительно центра ПЗС-матрицы ОЭК на величину $\Delta \tilde{x}(\Delta V_p)$. При достижении $\Delta \tilde{x}$ предельного значения Δx_{\max} формируется тормозной импульс ΔV_t . При этом смещение центра изображения ОО относительно центра ПЗС-матрицы ОЭК вследствие управляемого движения ЦМ КАР прекратится.

6. Включаются двигатели ориентации КАР с целью совмещения оси визирования ОЭК с линией, соединяющей ЦМ КАР, и создается управляющий момент:

$$M_i^{\text{упр}} = k_i v_0 v_i + k_{\omega} \omega_i. \quad (6)$$

7. Проверяются условия

$$\begin{cases} v_i \leq \Delta v_{\text{доп}}; \\ \lambda_i \leq \Delta \lambda_{\text{доп}}, \end{cases} \quad (7)$$

где λ_i – компоненты кватерниона $\Lambda_{\text{орб}}$ рассогласования связанного базиса E относительно орбитального;

$\Delta \lambda_{\text{доп}}$ – допустимое значения компонентов кватерниона $\Lambda_{\text{орб}}$.

В случае невыполнения вышеназванного условия пункты 5 и 6 повторяются.

8. Определяется относительное расстояние до ОО ρ на основе информации о его геометрических размерах и размере изображения на ПЗС-матрице ОЭК:

$$\rho = f \frac{d + d_{\text{изм}}}{d_{\text{изм}}}, \quad (8)$$

где d – размер ОО;

$d_{\text{изм}}$ – размер изображения на ПЗС-матрице ОЭК;

f – фокусное расстояние ОЭК.

Выполнение задачи начальной выставки КАР завершается при удовлетворении требований как к орбитальной ориентации, так и к угловой стабилизации относительно линии визирования OY_B ВСК.

С целью удовлетворения требований к относительному расстоянию ρ необходимо реализовать управление вдоль линии визирования. В случае размещения реактивных сопел для управления по оси OY ССК только с одной стороны КАР возникает необходимость выполнения угловых разворотов на 180° для выдачи тормозного импульса. В связи с этим целесообразным является использование КДУ, у которой реактивные сопла располагаются на каждой стороне КАР. После выполнения начальной выставки КАР займет положение, обеспечивающее выполнение облета с точностью, зависящей от точности орбитальной ориентации и точности определения параметров ориентации ОЭК.

Вывод. В работе предложен новый подход к решению актуальной задачи начальной выставки КАР для выполнения облета ОО. Предлагаемый алгоритм основан на использовании в качестве измерительного устройства ОЭК, что обеспечивает решение задачи навигации от-

носителем некооперируемого объекта, в качестве которого может выступать нефункционирующий ОО.

Список используемых источников

1. *Гончаревский В.С.* Взаимный маневр космических аппаратов при использовании непрерывных управляющих функций постоянной величины в орбитальной относительной системе координат // *Информация и космос*. – 2014. – № 1. – С. 90–93.
2. *Фоминов И.В., Королев С.Ю., Зоткин М.Ю.* Теоретический подход к созданию интегрированных навигационных систем с адаптивной комплексной обработкой информации // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2015. – № 646. – С. 68–76.

А.В. Шевченко,
кандидат техн. наук;
А.С. Юрьев,
доктор техн. наук, профессор

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙНЫХ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С НЕРАВНОМЕРНЫМ ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

Рассмотрено взаимодействие струйных органов управления движением летательного аппарата с неравномерным гиперзвуковым потоком. С помощью численных методов исследована возможность управления движением и обтеканием летательного аппарата с помощью системы веерных струй, установленной в нижней части летательного аппарата.

Ключевые слова: летательный аппарат, гиперзвуковой поток, численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В нашей стране и за рубежом на уровне государственных программ проводятся исследования по разработке и созданию как одноразовых гиперзвуковых аэробаллистических и трансатмосферных летательных аппаратов (ЛА), так и многоразовых воздушно-космических систем. Главной особенностью функционирования этих систем является активное их маневрирование на гиперзвуковых режимах полета, включающего полет с использованием аэродинамических сил в верхних слоях атмосферы.

Анализ траекторий ЛА данного класса показывает, что их значительную часть составляет гиперзвуковой полет в условиях высоких силовых и тепловых нагрузок. Таким образом, на первый план при создании высокоскоростных ЛА наряду с задачами разработки устойчивых к силовым и тепловым нагрузкам материалов и комбинированных двигательных установок выдвигается задача создания аэродинамических схем ЛА, обладающих высоким аэродинамическим качеством на сверх- и гиперзвуковых режимах полета и разработки отвечающих этим режимам способов и средств управления их движением.

Последнее определяет необходимость разработки новых и совершенствования существующих способов и средств управления движением ЛА с целью повышения эффективности и надежности их функционирования.

Перспективным направлением совершенствования аэродинамических характеристик (АХ) ЛА в широком диапазоне скоростей, особенно при существенных ограничениях на форму элементов конструкции, является управление обтеканием и движением – целенаправленное воздействие на воздушный поток в соответствии с требуемым изменением АХ и других параметров обтекания. По характеру воздействия на поток способы управления обтеканием и движением ЛА можно объединить в следующие основные группы:

- 1) механические – аэродинамические иглы, иглы с дисковыми насадками, интерцепторы, щитки, закрылки и т. п.;
- 2) газодинамические – использование массопотока (тангенциальные и радиальные газовые струи, впрыск жидкостей);
- 3) энергетические (тепловые) – подвод энергии различной природы (химической, электромагнитной, энергии лазерного или СВЧ излучения, кинетической) к набегающему потоку с последующим преобразованием ее в тепло;
- 4) комбинированные – представляющие комбинацию двух или трех перечисленных выше способов управления.

При разработке и создании гиперзвуковых ЛА приходится решать ряд проблем, связанных с созданием новых материалов и технологий, комбинированных двигательных установок, включающих твердотопливный ракетный двигатель, прямоточный воздушно-реактивный двигатель, жидкостный ракетный двигатель (особенно гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель со сверхзвуковым горением), работающих в широком диапазоне чисел Маха, и проектированием нового с аэродинамической точки зрения облика ЛА, а также органов управления их движением.

Наиболее полно к настоящему времени исследованы и применяются в практике авиа- и ракетостроения первые две группы способов управления обтеканием для достижения различных целей: механические (аэродинамические иглы, иглы с дисковыми насадками, интерцепторы, щитки, закрылки и т. п.) и газодинамические (тангенциальные и радиальные газовые струи, впрыск жидкостей т. п.). Известны их достоинства и недостатки. При условии устранения недостатков на основе комбинации механических и газодинамических способов, как показали приводимые результаты выполненных авторами численных исследований [1], могут быть разработаны эффективные средства управления движением. Очевидно, что только комплексное решение перечисленных выше проблем может привести к созданию конкурентоспособных типов гиперзвуковых ЛА.

Вследствие высоких силовых и тепловых нагрузок на аэробаллистические объекты, движущиеся с высокими скоростями в атмосфере, актуальным является стабилизация их движения с целью увеличения статической устойчивости и снижения силы лобового сопротивления. Решение данной проблемы возможно с помощью применения системы веерных струй различной интенсивности, выдуваемых из управляемого объекта (рис. 1).

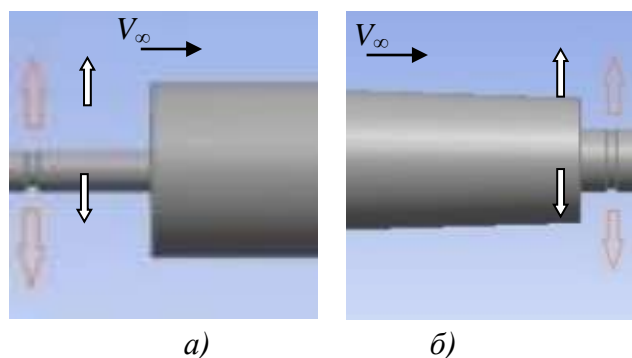


Рис. 1. Система веерных струй на носовой (а) и кормовой (б) иглах, установленных на цилиндрическом теле

В работах [1, 2] показано, что при применении веерных струй, выдуваемых из носовой иглы, возможно существенное снижение силы лобового сопротивления. На рис. 2 приведены зависимости коэффициента силы лобового сопротивления от длины иглы и числа Маха набегающего потока, полученные расчетным и экспериментальным путями, имеющие хорошее согласование. Однако при этом тела определенных форм становятся статически неустойчивыми. Для исключения этого негативного влияния применения носовых струй, эффективно снижающих силу лобового сопротивления, было исследовано влияние веерных струй, выдуваемых из кормовой части ЛА.

Результаты таких исследований показали, что совместное применение носовых и кормовых веерных струй позволяет снизить силу лобового сопротивления (на 60%) и повысить статическую устойчивость ЛА.

Дополнительное снижение коэффициента силы лобового сопротивления достигается за счет повышения донного давления, вызванного взаимодействием кормовых струй со сверхзвуковым потоком (рис. 3). На этом примере видно, что применение органов управления обтеканием и движением ЛА, использующих одиночные струи, выдуваемые в определенном

месте, или системы таких струй в комбинации с механическими средствами управления движением, может оказаться перспективным направлением совершенствования гиперзвуковых ЛА.

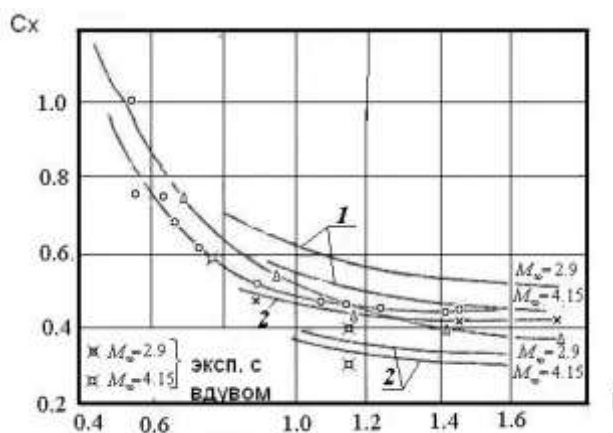


Рис. 2. Зависимость коэффициента силы лобового сопротивления от длины иглы при различных числах Маха

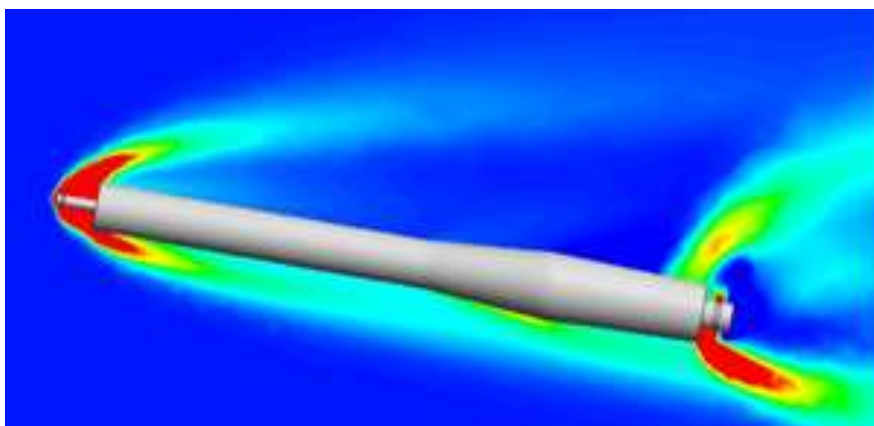


Рис. 3. Картина обтекания ЛА при использовании комбинированных средств управления

Как известно, при взаимодействии газовой струи со сверхзвуковым потоком в области вдува реализуется сложная газодинамическая структура, схема которой показана на рис. 4. Здесь следует отметить, что применение струйных органов для создания управляющих сил и моментов может оказать существенное влияние на распределение давления, т. е. на АХ.

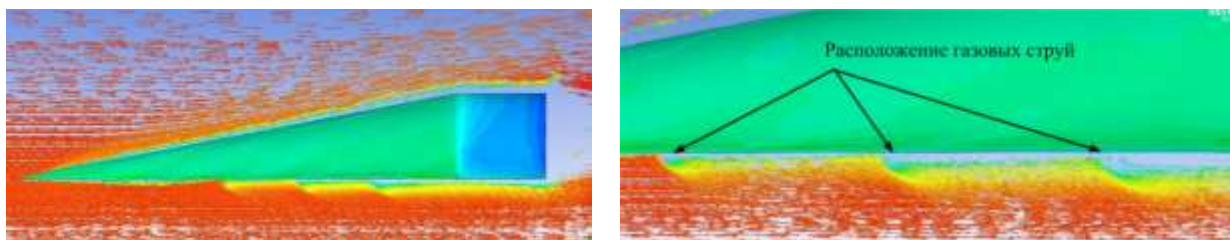


Рис. 4. Газодинамическая структура при вдуве струи газа в неравномерный сверхзвуковой поток

Перед местом выдува струи образуется достаточно развитая возвратно-циркуляционная зона, отделенная от внешнего набегающего сверхзвукового потока косым скачком уплотнения. Перед струей образуется мощный отсоединенный скачок уплотнения, интенсивность которого уменьшается при его проникновении в глубь сверхзвукового потока.

За струей образуется вихревой след, возможно образование местных возвратно-циркуляционных зон с пониженным давлением. Следует отметить, что давление в области вдува существенно увеличивается, это связано прежде всего с возникновением местных скачков уплотнения.

Системы управления движением, основанные на комбинации системы струй и игл, представляют собой совокупность нескольких сопел, расположенных параллельно и перпендикулярно оси ЛА на определенном удалении от центра масс. Они могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах, создавая управляющие моменты относительно всех трех осей. Применение данной системы струй является эффективным способом снижения C_x . Кроме того, они также могут использоваться для защиты корпуса ЛА от аэродинамического нагрева.

Взаимодействие выдуваемых струй с неравномерным гиперзвуковым потоком позволяет создавать управляющие силы и моменты, оказывая при этом большое влияние на ударно-волновую структуру вблизи поверхности обтекаемого тела. Это влияние может быть негативным или позитивным, что определяет необходимость комплексного исследования как АХ, так и создания управляющих сил и моментов, основанных на взаимодействии выдуваемых в неравномерный гиперзвуковой поток поперечных струй.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

С использованием программного комплекса ANSYS CFD (лицензия ВКА имени А.Ф. Можайского №1020993), основанного на численных решениях уравнений Навье – Стокса, было исследовано взаимодействие струйных органов управления движением ЛА с неравномерным гиперзвуковым потоком.

В качестве исходных данных для расчета принято следующее: параметры набегающего потока ($M_\infty = 20$; $H_\infty = 60$ км, $\alpha = 0^\circ$), параметры струи ($M_{ст} = 1$; $\rho_{ст} = 1,225$ кг/м³; $T_{ст} = 300$ К; $p_{ст} = 101$ и $151,9$ кПа). В качестве исследуемого газа выбран воздух ($\kappa = 1,4$), который предполагается вязким и теплопроводным.

Расчет проводился при режиме течения сплошной среды $Kn_\Delta < 0,01$ (Δ – расстояние отхода ударной волны). Тем не менее при некоторых условиях полета затупленного тела параметры набегающего потока могут не соответствовать режиму сплошной среды. Однако возрастание плотности при переходе через отошедший скачок уплотнения сопровождается уменьшением местной средней длины свободного пробега, благодаря чему условия течения вблизи тела соответствуют условиям течения сплошной среды.

В качестве модели турбулентности, замыкающей уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, использовалась модель переноса сдвиговых напряжений Ментнера (SST) [3]. Проведенный анализ показал, что по сравнению с другими используемыми в настоящее время моделями турбулентности подход Ментнера демонстрирует достаточно высокую эффективность при расчетах характеристик обтекания тел сложных форм.

Для лучшей сходимости решения уравнений размеры расчетной области были определены исходя из того, что головной скачок уплотнения не пересекается с верхней границей области решения.

Применявшиеся в расчетах сетки имели размерность примерно $1,6 \times 10^6$ тетраэдральных элементов. Расстояние от первой расчетной точки до стенки обеспечивало подходящий для используемой модели диапазон значений нормированного расстояния y^+ от 15 до 30 и явля-

лось достаточно малым для определения местных газодинамических и тепловых характеристик поверхности ЛА.

Исследуемая модель показана на рис. 5.



Рис. 5. Модель ЛА (эллиптический полукуноус с плоским нижним срезом)

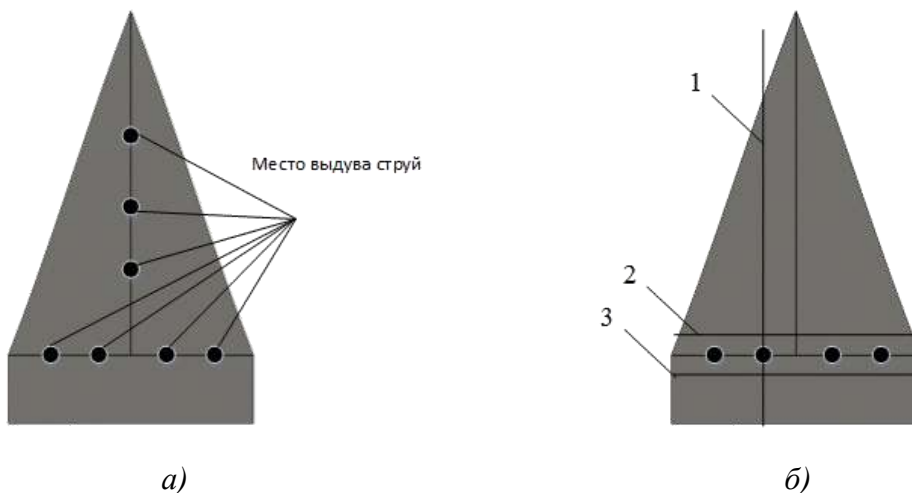


Рис. 6. Расположение газовых струй (а) и места определения параметров плотности и давления линий 1, 2 и 3 (б)

Место расположения струйных органов управления в продольном и поперечном направлении, а также места определения параметров плотности и давления вблизи ЛА показаны на рис. 6. Аппроксимация расчетной области вблизи ЛА изображена на рис. 7.

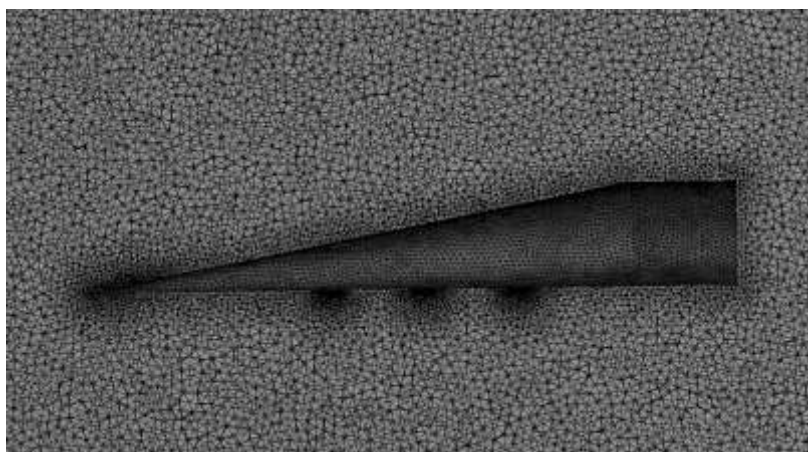


Рис. 7. Аппроксимация конечными элементами расчетной области

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты численного эксперимента по исследованию взаимодействия системы струй с гиперзвуковым потоком приведены на рис. 8–15 в виде изолиний давления в зоне взаимодействия и следе, а также графиков распределения давления на нижней поверхности ЛА.

На рис. 8,а изображены линии тока, образованные выдуваемым газом. Здесь видно, что дискретность струй не нарушается после их поворота по потоку. Такое поведение струй в потоке (четкость их границ) свидетельствует о том, что плотность в струях выше, чем в спутном потоке, т. е. можно считать, что границы струй являются контактными разрывами. Это подтверждается также характером распределения давления по нижней поверхности ЛА (рис. 8,б и 9). На основании этого можно сделать вывод о несущественном взаимном влиянии струй, что дает возможность при необходимости отключить отдельные струи без изменения режима течения оставшихся для совершения маневра.

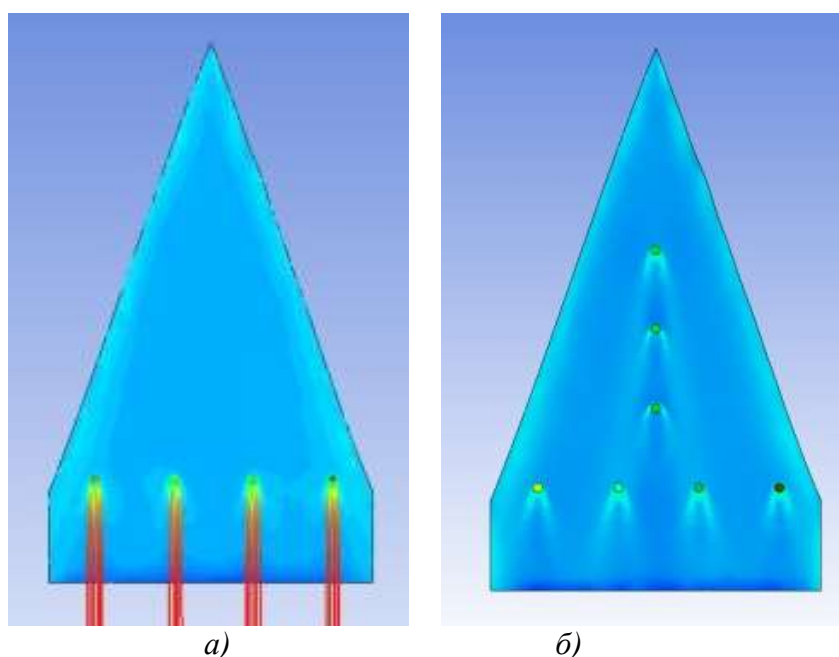


Рис. 8. Структура потока при выдуве системы струй (а) и распределение коэффициента давления по нижней поверхности тела (б)

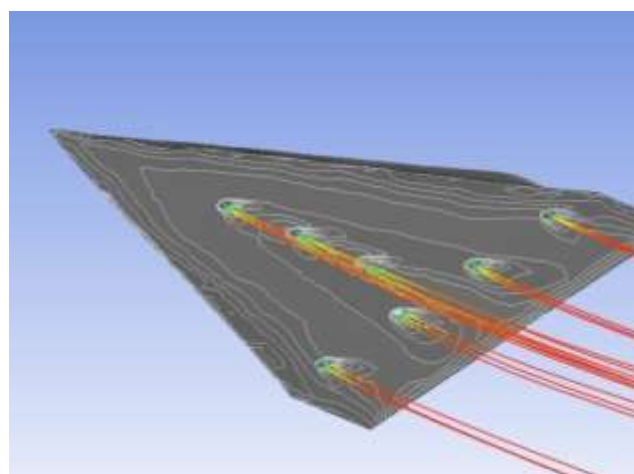


Рис. 9. Распределение давления по нижней части поверхности тела при использовании системы струй

На рис. 10–12 изображены графики распределения давления и плотности без выдува струй на нижней поверхности ЛА вдоль линий 1, 2 и 3 (см. рис. 6,б). Здесь линия 1 – линия по длине ЛА вблизи плоскости симметрии; линия 2 – линия, перпендикулярная плоскости симметрии, расположена перед линией выдува струй; линия 3 – то же, что и линия 2, но расположена она после линии выдува струй.

Из рис. 10 (линия 1) видно, что распределение давления и плотности на нижней поверхности конической части остается постоянным. Локальное повышение давления и плотности вызвано головным скачком уплотнения (основной поток направлен справа-налево). На этом же рисунке (линии 2 и 3) видно, что распределение давления и плотности без выдува струй идентично. Локальное повышение параметров у передней кромки вызвано головным скачком уплотнения.

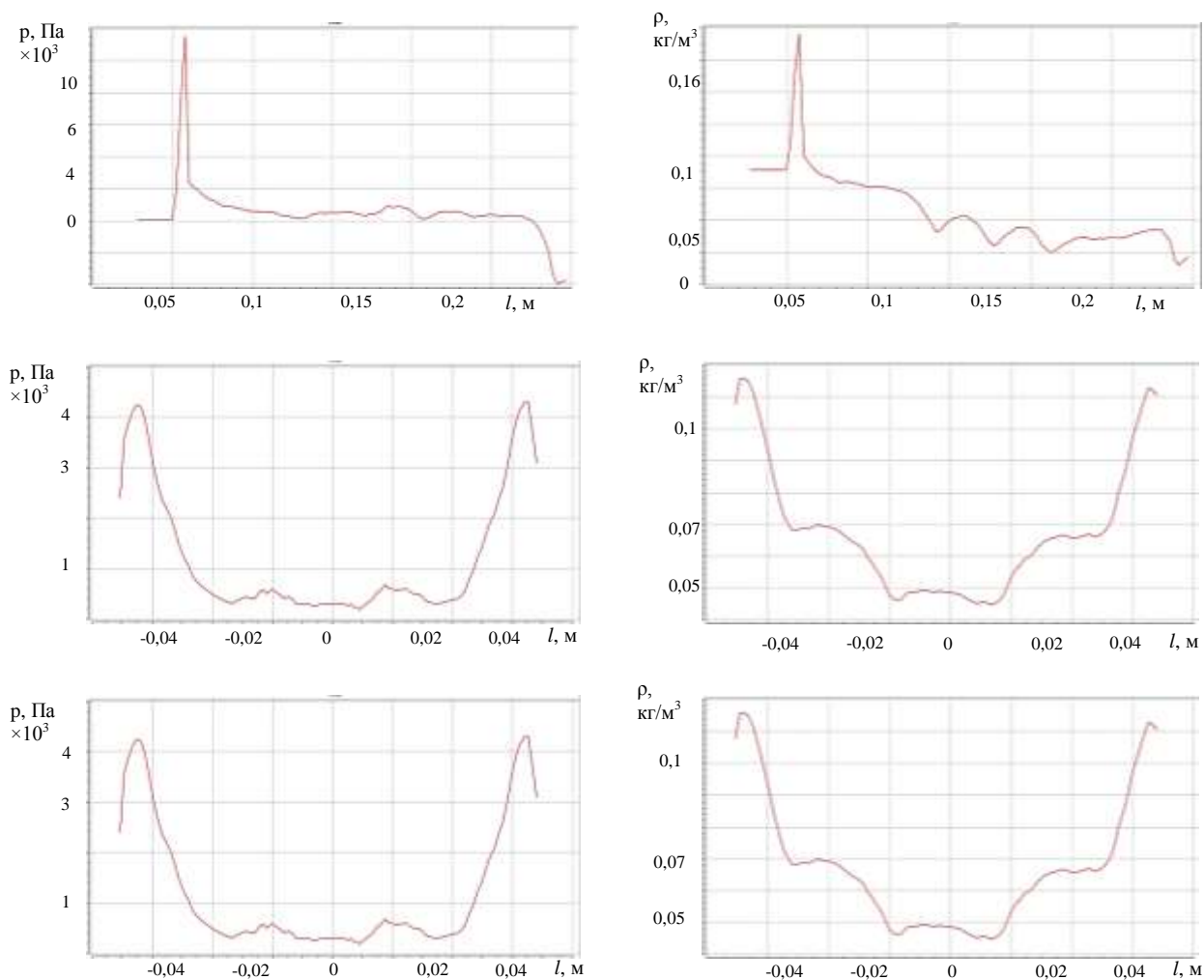


Рис. 10. Распределение коэффициента давления и плотности по нижней поверхности тела (линии 1–3 на рис. 6), без выдува струй ($C_x=0,014$)

Графики, изображенные на рис. 11 и 12, показывают, что вдув струй вызывает существенное перераспределение давления и плотности. При этом увеличение давления торможения в струе с 101 кПа до 151 кПа не меняет характера распределения, а вносит лишь количественные изменения. Здесь необходимо отметить, что дискретный характер изменения параметров вдоль струй (см. рис. 8,а), как это отмечалось выше, сохраняется. Последнее справедливо для больших высот и будет нарушаться на высотах, меньших 40 км.

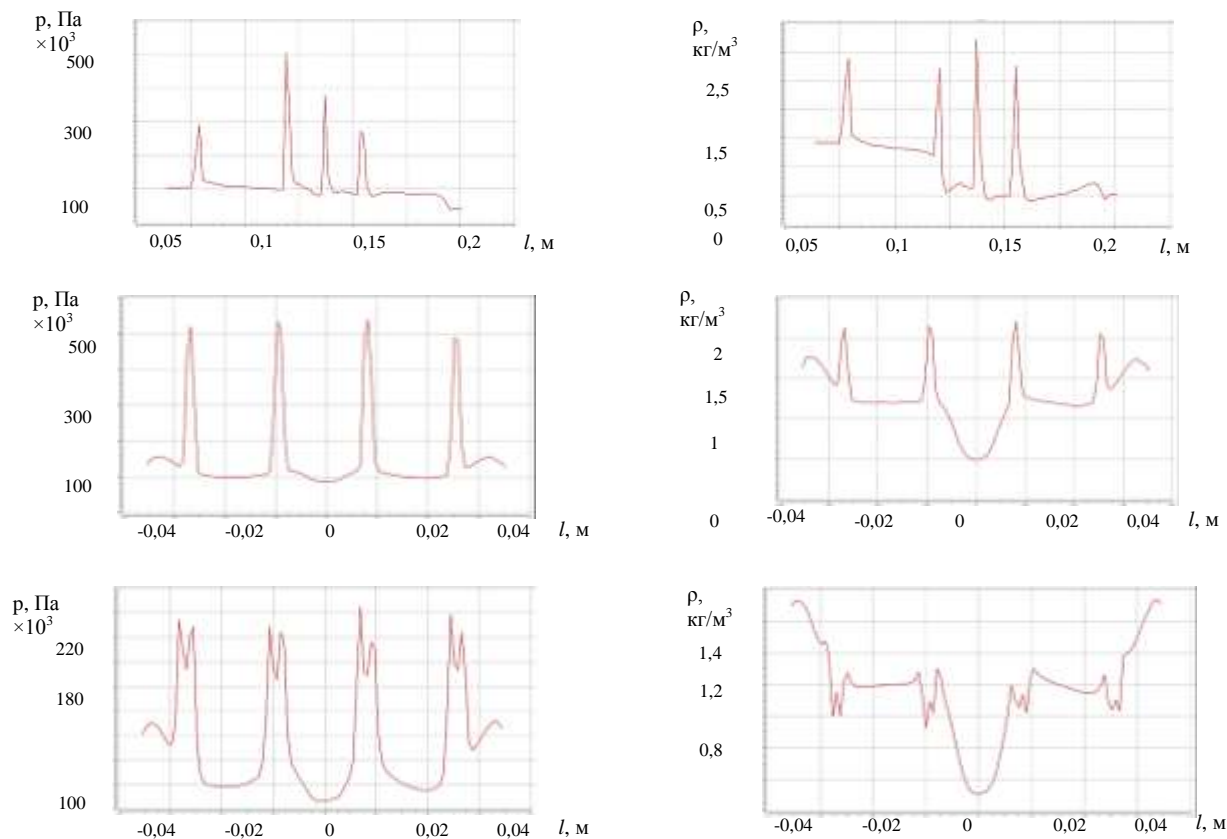


Рис. 11. Распределение коэффициента давления и плотности по нижней поверхности тела (линии 1–3 на рис. б) при выдуве ($P_{стп}=101$ кПа) ($C_x=0,015$)

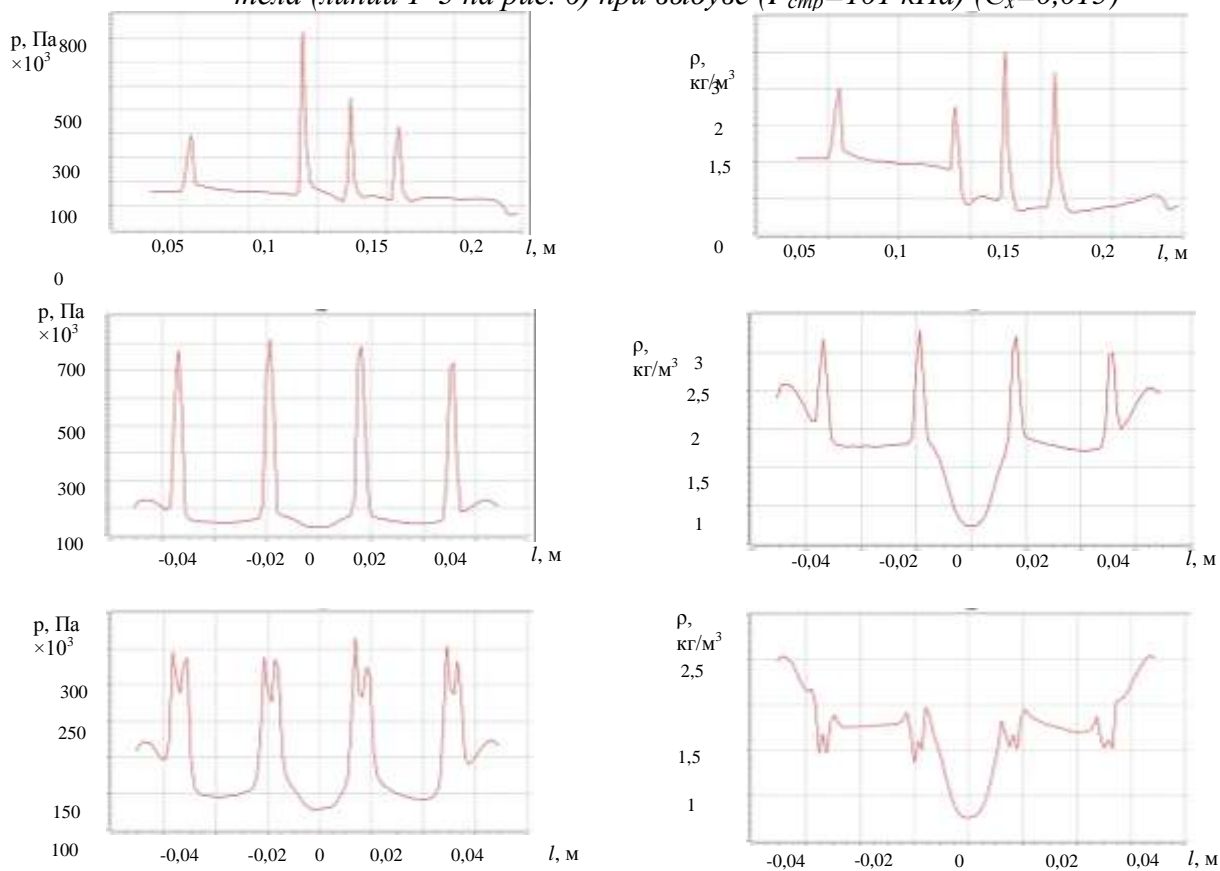


Рис. 12. Распределение коэффициента давления и плотности по нижней поверхности тела (линии 1–3 на рис. б) при выдуве ($P_{стп}=151$ кПа) ($C_x=0,0158$)

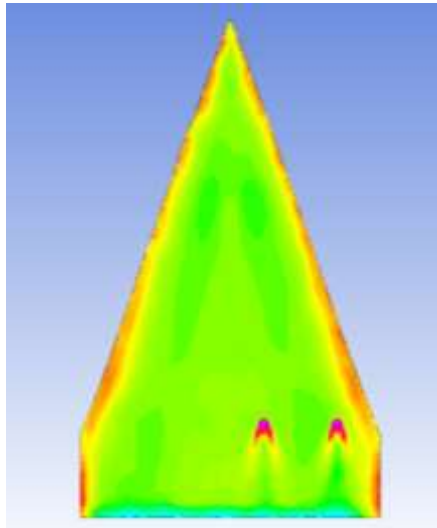


Рис. 13. Распределение коэффициента давления по нижней части поверхности ЛА с использованием системы струй для образования момента крена

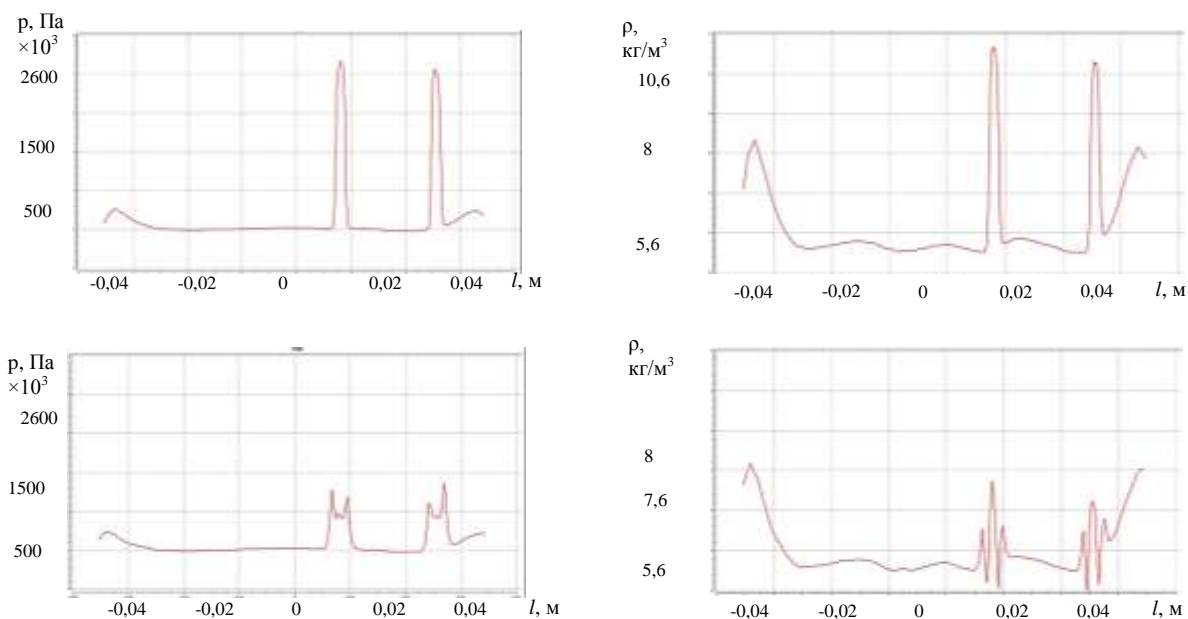


Рис. 14. Распределение коэффициента давления и плотности по нижней поверхности тела (линии 2, 3 на рис. 6) с использованием асимметричного выдува струй ($P_{стр} = 151 \text{ кПа}$) ($C_x = 0,0157$)

Анализ газодинамических картин и представленных графиков позволяет сделать вывод, что вдув газа в нижнюю часть ЛА приводит к возникновению локальной возмущенной зоны повышенного давления, благодаря чему происходит возникновение управляющих моментов. Помимо изменения давления претерпевают деформацию поля плотности, температуры и чисел Маха и т. д.

Особого внимания заслуживают устройства, показанные на рис. 15. Они иллюстрируют возможность использования энергии набегающего потока путем забора воздуха из зон его торможения для носовых струй (рис. 15,а) и забор воздуха в специальном канале для кормовых струй (рис. 15,б).

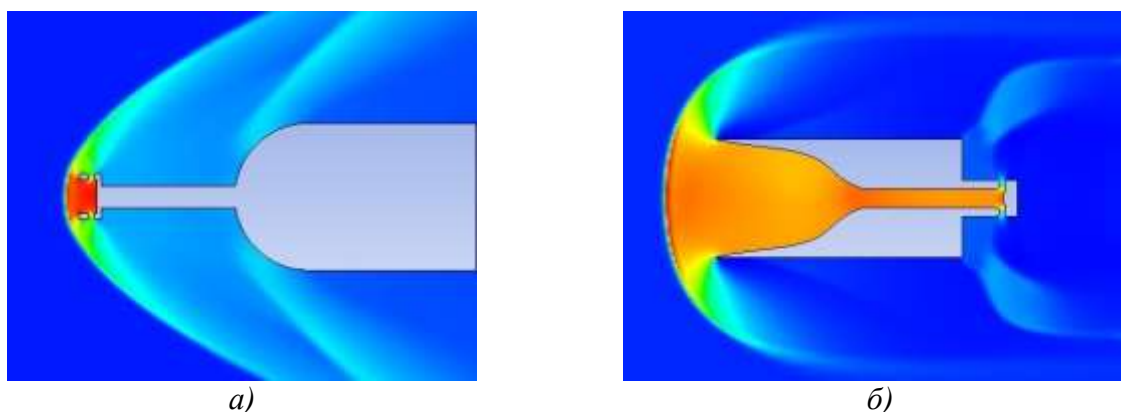


Рис. 15. Использование энергии набегающего потока с использованием носиковой иглы (а) и хвостовой иглы (б)

На рис. 15,а изображен воздухозаборник, вход в который расположен на лобовой поверхности иглы, из которого «заторможенный» воздух поступает в каналы веерной струи, истекающей из боковой поверхности воздухозаборника. Здесь «заторможенный» воздух используется в ударном слое иглы с воздухозаборником для организации носиковой веерной струи. На рис. 15,б можно видеть, что из профилированной камеры заторможенный воздух может поступать в хвостовую часть за донным срезом для создания хвостовой веерной струи, стабилизирующей движение ЛА и снижающей донное сопротивление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования взаимодействия поперечных струй с неравномерным гиперзвуковым потоком позволяют сделать вывод о том, что газодинамические органы управления обтеканием ЛА, а также создание управляющих сил и моментов могут оказаться перспективным направлением совершенствования гиперзвуковых ЛА при условии:

- решения вопросов управления движением с помощью струйных органов совместно с вопросами обеспечения высоких аэродинамических характеристик;
- дополнительного проведения исследований для повышения эффективности струйных органов управления в комплексе с механическими средствами управления движением и аэродинамическими характеристиками.

Список используемых источников

1. Численное исследование обтекания тела сверхзвуковым потоком с кольцевой зоной энерговыделения / А.В. Шевченко, А.С. Юрьев, И.А. Дема и др. // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы совершенствования тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации», 9 – 10 апреля 2013 г. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013 – С. 25–34.
2. Рыжов Е.В., Юрьев А.С. Ударный слой тел вращения с веерными струями. – М., 1984. – 16 с. – Деп. в ЦИВТИ МО, № 27999. Сер. В.
3. CFD Simulations of Aerodynamic Flows with a Pressure-Based Method / F.R Mentner, P.F. Galpin, T. Esch, M. Kuntz, C. Berner // Paper ICAS 2004-2.4.1. – Japan, Yokohama, 2004. – 11 p.

А.Н. Быкова,
кандидат педагогических наук;
Н.С. Яснова,
кандидат педагогических наук, доцент

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОММУНИКАТИВНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ НА СТАРШИХ КУРСАХ ВОЕННОГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ В РАМКАХ ДИСЦИПЛИНЫ «ИНОСТРАННЫЙ ЯЗЫК»

Анализируются особенности формирования коммуникативных компетенций на старших курсах военного учебного заведения при обучении иностранным языкам. Отмечается, что современные педагогические исследования описывают множество компетенций, которые по-разному взаимодействуют друг с другом, причем для современной методики преподавания иностранного языка в военно-техническом вузе в качестве ведущей выступает коммуникативная компетенция. Обосновывается тот факт, что доведение до сведения курсантов особенностей военно-научного стиля является необходимой составной частью формирования дискурсивной компетенции, так как овладение данной компетенцией позволит военным специалистам адекватно и грамотно вести себя в рамках речевого события и управлять им.

Ключевые слова: коммуникативная компетенция, коммуникативная деятельность, речевая деятельность, дискурсивная компетенция.

Понятие компетенция, принятое научно-педагогическим сообществом в последнее десятилетие, широко используется в методике преподавания иностранных языков при определении общих и частных целей обучения на уровне как среднего, так и высшего образования. В современной методической науке под компетенцией понимается совокупность знаний, умений и навыков в изучаемой области. Кроме того, используется термин компетентность, подразумевающий свойства личности и ее способности к выполнению деятельности на основе сформированной компетенции.

Многочисленные педагогические исследования описывают множество компетенций, которые по-разному взаимодействуют друг с другом. Для современной методики преподавания иностранного языка в военно-техническом вузе ведущей является коммуникативная компетенция, которая, как признано уже большинством исследователей, и данный факт подтверждается анализом научно-педагогической литературы, включает лингвистическую, речевую, дискурсивную, стратегическую (компенсаторную), социальную (прагматическую), социокультурную, предметную и профессиональную компетенции.

Коммуникативная компетенция при обучении иностранному языку – это совокупность знаний о системе языка и его единицах, их построении и функционировании в речи, о способах изложения мысли на изучаемом языке и понимания суждений других, о специфике различных типов дискурсов; это способность объекта обучения средствами изучаемого языка осуществлять как устное, так и письменное общение в рамках различных видов речевой деятельности в соответствии с решаемыми коммуникативными задачами. Поскольку коммуникативная деятельность неотделима от деятельности речевой, а речь неотделима от языка, знания об изучаемом иностранном языке как о системе знаков являются фундаментом коммуникативной компетенции, который в условиях военного вуза закладывается на начальном этапе обучения.

Речевая компетенция (то есть знание способов формирования и формулирования мыслей и умение пользоваться этими способами в процессе передачи и восприятия речи) развивается параллельно с изучением структуры языка как на начальном, так и на продвинутом уровне, причем на старших курсах акцент делается уже на совершенствовании профессионального общения.

Таким образом, коммуникативные компетенции в военном учебном заведении формируются в процессе учебной деятельности в рамках дисциплины «Иностранный язык» на протяжении всего курса обучения. Данный процесс на методическом уровне проявляется, например, при аудировании иноязычных текстов.

Как известно, цель аудирования – восприятие, понимание и переработка воспринятой на слух информации – достижима только при условии сформированности определенных коммуникативных компетенций, основанных на следующих умениях:

- концентрировать внимание на содержании текста с учетом определенной коммуникативной установки – запомнить информацию, ответить на вопрос, выявить проблему, оценить аргументы и т. д.

- членить текст на смысловые части, определяя ведущую мысль каждой из них;

- синтезировать общее содержание текста, его тему, выявлять основную мысль текста в целом;

- фиксировать в процессе слушания текста ключевые слова, на основе которых необходимо уметь воспроизводить логико-композиционную структуру текста;

- составлять план текста;

- распознавать прагматическую установку текста.

Для проверки понимания смысла услышанного текста в полном объеме преподаватель использует контрольно-диагностические задания, такие как:

- ответы на вопросы по тексту;

- составление плана текста в вопросительной и назывной форме;

- краткий пересказ текста.

Коммуникативные компетенции формируются и имеют определенные особенности также и при обучении чтению. Цель чтения – аналитико-синтетической деятельности – может быть достигнута при условии учета вида чтения по целевой установке (ознакомительное, изучающее, поисковое) и при условии сформированности таких общих коммуникативных умений, как:

- умение определять тему текста, подтемы, используемые для развития главной идеи текста, основную мысль текста;

- умение оценивать информацию текста по ее важности для раскрытия темы (главное/второстепенное);

- умение выявлять структурно-логические части текста, осмысливать их содержание и устанавливать отношения между ними.

При обучении ознакомительному чтению военно-научный, военно-технический или военно-публицистический текст воспринимаются однократно в режиме дефицита времени с целью усвоения основной информации, при этом развиваются умения:

- прогнозировать содержание текста небольшого объема по заголовку, многоуровневого текста – по оглавлению его частей;

- разграничивать основную и второстепенную информацию, составляющую содержание текста;

- выявлять ключевые слова и опорные предложения;

- делать самостоятельные выводы-обобщения на основе прочитанного;

- фиксировать профессионально значимую информацию текста, отличающуюся новизной.

Данные умения способствуют, в свою очередь, формированию требуемых программами обучения соответствующих коммуникативных компетенций.

Обучение же изучающему чтению осуществляется при соблюдении иных условий: военно-научный текст воспринимается курсантами без четкого ограничения времени, однако с установкой на точное усвоение его содержания и адекватную интерпретацию на родном языке, чему способствует возможность неоднократного обращения к тексту. Изучающее чтение опирается на следующие коммуникативные умения:

- оценивать важность информации для реализации авторского замысла;

- стремиться понять содержание текста в полном объеме;
- выявлять отношения обусловленности между смысловыми элементами текста;
- составлять план текста, схемы и таблицы, кратко дающие представление о его содержании.

Для повышения эффективности формирования коммуникативных компетенций на старших курсах особенно актуально обучение поисковому чтению, главной установкой которого является выявление необходимой информации в большом по объему тексте научного стиля, осуществляемое иногда в режиме дефицита времени. Данное условие особенно характерно именно для высших учебных заведений военного профиля. Для будущего военного профессионала чрезвычайно важны следующие коммуникативные умения, формируемые при поисковом чтении:

- определять структурно-логический тип текста, учитывая содержание составляющих его частей;
- находить информацию, имеющую непосредственное отношение к изучаемой профессиональной проблеме, опираясь на первые предложения абзацев;
- выявлять доказательную базу текста, содержащуюся в середине отдельных абзацев;
- прогнозировать содержание нижеследующих частей текста;
- составлять рабочие заметки по тексту на изучаемом иностранном языке с выявлением фрагментов, требующих дальнейшего подробного изучения;
- создавать вторичные тексты – аннотации, рефераты, научные доклады, научные обзоры на изучаемом иностранном языке.

Последний пункт особенно важен с точки зрения соответствия процесса обучения требованиям ФГОСов. Дело в том, что чтение научно-технических журналов и публикаций в интернете по профилю изучаемой специальности, в частности на английском языке, занимает значительное место в структуре профессионального информационного потока, однако не является единственным видом организации письменной коммуникации специалистов. Будущие специалисты знакомятся с отраслевыми справочниками, патентными описаниями, стандартами и нормативами, инструкциями и методическими рекомендациями, материалами научных конференций, симпозиумов уже на этапе вузовского обучения.

Сложность проблемы заключается в том, что необходимо не только обучать работе с аутентичными ресурсами, но и формировать умение обрабатывать информацию. При этом понимание смысла научно-технического текста необходимо сочетать с умением выделять его основные смысловые положения. Выделение, формулирование и фиксация наиболее важных смысловых моментов являются необходимыми при создании вторичных текстов.

В данной связи важно понимать и разграничивать с точки зрения педагогической психологии тот факт, что существуют коммуникативные компетенции, реализуемые в рецептивных видах речевой деятельности, то есть от информации к ее адресату, и в продуктивных видах – от автора к информации. Таким образом, коммуникативные компетенции имеют два вида реализации – коммуникативные компетенции адресата информации и коммуникативные компетенции автора – производителя информации. Последние являются актуальными и формируются, например, при создании аннотаций и рефератов на изучаемом иностранном языке.

Однако методические исследования и педагогическая практика конца прошлого века сводились к обучению в основном лексическому и грамматическому аспектам языка, а также обучению чтению и последовательному переводу научно-технической литературы по специальности.

Обучение созданию вторичных текстов является сравнительно новым направлением в обучении иностранным языкам и требует особых методических подходов и специфических приемов, которые находятся пока еще в стадии становления. Однако некоторым практическим опытом обучения курсантов старших курсов основам аннотирования иноязычных тек-

стов по профилю изучаемой специальности кафедры иностранных языков ВКА имени А.Ф. Можайского уже располагает.

Практика обучения смысловой компрессии англоязычного научно-технического текста, предпринятая на кафедре в 2013 году в формате педагогического эксперимента, показала, что для написания краткой аннотации (abstract, summary) обучающимся следует:

- выполнить анализ текста с целью поиска главной идеи и конфигурации ее развития в составе абзаца или группы абзацев;

- зафиксировать ключевые слова и ключевые лексические фрагменты, которые могут быть использованы без изменения при составлении вторичного текста (аннотации);

- произвести компиляцию вторичного текста с использованием языковых клише, типовых для вторичных текстов (на изучаемом иностранном языке) синтаксических конструкций при сохранении стилистических особенностей и редакционных требований.

Необходимо отметить, что для написания аннотации на английском языке требуется серьезная предварительная подготовка по усвоению особенностей лексико-грамматической структуры английского научного текста, которая характерна для любой специальности в области естественнонаучных знаний.

Для адекватного восприятия курсантами старших курсов и слушателями сути работы по созданию вторичных текстов, а также для развития у них коммуникативных компетенций автора – производителя информации – были разработаны методические рекомендации «Текст как объект аннотирования». В этой книге дается характеристика понятия «текст», излагаются особенности построения английских научно-технических и военно-публицистических текстов, сообщаются разнообразные виды и приемы анализа текстов, в частности, приводятся инновационные методики «вертикального» прочтения текстового материала, а также возможности сокращения языкового материала при сохранении общего смысла прочитанного.

Однако информация о некоторых основных положениях лингвистики текста вполне может быть представлена на английском языке и обсуждена в рамках общей дискуссии на английском языке, например, на тему «How to find the main idea of paragraph?»

На кафедре была успешно проведена практическая работа по написанию аннотации, имеющей трехступенчатую структуру: тема публикации – главная идея, проблема, суть – читательский адрес. Курсанты тренировались в написании фронтально, когда аннотируемый текст был одинаковым для всех, и индивидуально, когда тексты, разнообразные по тематике, выдавались в качестве домашнего задания, а аннотации к данным текстам обсуждались также и в индивидуально порядке.

Таким образом, формирование коммуникативной компетенции на продвинутом этапе обучения осуществлялось на креативном уровне в условиях, способствующих трансформации объекта обучения, в данном случае – курсантов старших курсов, в субъект продуктивной деятельности, как того и требуют новые образовательные стандарты.

Изучение иностранных языков на старших курсах в академии базируется в настоящий момент на тематике, связанной с текстами военного и военно-технического характера, поэтому особенно актуально при отборе содержания обучения и методических приемов уделять максимальное внимание формированию дискурсивной компетенции. Понятие «дискурс» с точки зрения лингвистики определяется как речь, адекватно вписанная в коммуникативную ситуацию, поэтому дискурсивная компетенция является, по мнению большинства исследователей, одной из наиболее важных наряду с языковой и речевой компетенциями, входящими в общий спектр сложной коммуникативной компетенции.

Будущие военные специалисты должны четко усвоить, что военные документы, тексты военно-технического характера и официальная переписка изобилуют специальной терминологией, относящейся как непосредственно к военному делу, так и к различным областям техники, которая используется в армии. Никакие нормы живой разговорной речи, и в частности профессионализмы, выступающие под термином «военный сленг», широко используемые в

живом общении военнослужащих между собой, не употребляются в официальных документах.

Функциональная нагрузка, характеризующая военную сферу общения, определяет категоричность требований к построению военного текста: сжатость, четкость и конкретность формулировок, использование узкоспециальных терминов, точность и ясность изложения, стройность построения, структурированность материала, четкое разграничение мыслей, легкость восприятия заложенной в тексте информации посредством использования структурных схем и иллюстраций.

Ознакомление курсантов с особенностями военно-научного стиля является необходимой составной частью формирования дискурсивной компетенции. Овладение данной компетенцией позволит военным специалистам не только адекватно и грамотно вести себя в рамках речевого события, но и, что особенно важно для военного профессионала, управлять им. Многие исследователи сегодня полагают, что именно дискурс должен являться основой обучения на продвинутом этапе, поскольку адекватность речевого поведения определяется достижением коммуникативных целей. При этом, чем быстрее и точнее поставленные цели достигаются, тем выше уровень сформированности коммуникативной компетенции и, следовательно, выше статус военного профессионала.

Таковы в общих чертах особенности формирования коммуникативных компетенций на старших курсах военного учебного заведения в рамках дисциплины «Иностранный язык». Анализ данных особенностей позволяет утверждать, что компетентностный подход является неотъемлемой частью современной образовательной стратегии, и это находит соответствующее отражение в совершенствовании традиционных и создании новых педагогических технологий.

Список используемых источников

1. *Влацен Л.М.* Обеспечение качества образования: проблемы и способы их решения. – М.: Наука, 1993.
2. *Марон А.Е. Монахова Л.Ю.* Концепция развития открытых систем образования взрослых. – М., 2008.
3. *Откупщикова М.И.* Синтаксис связного текста (структурная лингвистическая модель): докт. дисс. – Л.: ЛГУ им. А.А. Жданова, 1987.
4. *Седов К.Ф.* Дискурс и личность: эволюция коммуникативной компетенции. – М., 2004.
5. *Тесленко В.И.* Коммуникативная компетентность: формирование, развитие, оценивание. – Красноярск, 2007.
6. Hutchinson T., Waters A., *English for specific purposes.* – Cambridge: CUP, 1978.

Н.А. Станкевич;
Э.А. Шакирова,
кандидат техн. наук, доцент

ОТРАЖЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ НАУКИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КУРСА ФИЗИКИ В АКАДЕМИИ

Приводится ряд новых понятий по актуальным вопросам современной науки и доказывается необходимость их отражения при изучении курса физики в академии. Включение в содержание занятий вопросов по современным достижениям (открытиям) физики позволяет совершенствовать фундаментальную подготовку обучающихся, повышает интерес к занятиям и мотивацию курсантов к учебе.

Ключевые слова: образование, элементарные частицы, гравитационное взаимодействие, черная дыра, теория струн, Хиггс, полупроводниковые структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из требований к содержанию учебного материала является соответствие его содержания уровню современной науки. Физическое образование для инженерных специальностей, особенно в области наукоемких технологий, должно содержать актуальную информацию о современных достижениях во всех областях науки и техники. Сегодня накоплен большой объем знаний, которые позволяют понимать фундаментальные законы природы и практически использовать их в нашей жизни. Материал, предложенный в работе, может стать дополнительным к общему курсу физики, изучаемому в вузе.

На рис. 1 показана связь некоторых тем рабочей программы по физике с перечнем отдельных вопросов, отражающих современные достижения в этой области. Даже поверхностный анализ содержания информации, приведенной на рисунке, показывает, что не все вопросы в полной мере раскрыты в рамках тем курса физики. В первую очередь это обусловлено ограниченным ресурсом времени, отводимым на изучение того или иного вопроса.

Современный курс физики в инженерном вузе построен с учетом рекомендаций, выданных научно-методическим советом по физике Министерства образования и науки Российской Федерации для высших учебных заведений [1]. Согласно этим требованиям базовый уровень программы по физике рассчитан на 10–14 зачетных единиц и предполагает, что результатом обучения станет способность решать сложные задачи, требующие знания *всех разделов* физики. Основным фактором при изучении курса физики становится не объем фактов из разных областей науки, а логическое осмысление, оценка этих фактов, анализ взаимосвязи фундаментальных положений физики. Для инженерного вуза основной задачей реализации рабочей программы по физике является формирование у обучающихся знаний и навыков, необходимых для успешного освоения дисциплин профессионального цикла в рамках укрупненных групп специальностей подготовки. Именно поэтому не все вопросы физики могут быть рассмотрены одинаково глубоко и детально. Это зависит в первую очередь от специфики вуза.

Чтобы исключить возможные пробелы в знаниях, существуют различные формы обучения. Одной из таких форм является внеаудиторная работа с обучающимися, которая широко развита в академии. Так, по курсу физики эта работа проводится в рамках Клуба космических знаний, факультатива по физике, курсантских конструкторских бюро. В рамках занятий Клуба космических знаний более широко и детально рассматриваются вопросы, связанные с последними достижениями современной науки. Кроме обмена знаниями обучающиеся приобретают навык самостоятельной работы с научной литературой, умение правильно форму-

лизовать свои мысли и докладывать их. Тематика факультативных занятий определяется спецификой укрупненных групп специальностей подготовки.

№ п/п	Новейшие достижения физической науки	№ перечня	Разделы и темы		Кол-во часов
			№	Тема	
1	Бозон Хиггса	1,2,3	Раздел 7.	Основы ядерной физики	14
2	Стандартная модель		Тема 37	Космическое излучение. Элементарные частицы.	2
3	Теория струн	4	Раздел 3.	Электричество и магнетизм	34
4	Волны тяготения		Тема 18	Магнитное поле постоянного тока	8
5	Голографический принцип черных дыр		Тема 19	Силовое действие магнитного поля	6
6	Полупроводниковые структуры; нанотехнология	5	Раздел 1.	Физические основы механики	32
			Тема 5	Тяготение. Элементы теории поля тяготения	2
			Раздел 4.	Колебания и волны. Волновая оптика	58
			Тема 26	Интерференция света	8
	а) полупроводниковые гетероструктуры (разработки Ж.И. Алферова)	6 (а)	Раздел 4.	Колебания и волны. Волновая оптика	58
			Тема 27	Дифракция света	8
			Раздел 6.	Основы квантовой статистики и физики твердого тела	24
			Тема 33	Основы зонной теории твердого тела	10
б) приборы на основе квантовых эффектов (туннельные и силовые микроскопы)	6 (б, в, г)	Раздел 5.	Основы квантовой физики	32	
		Тема 30	Элементы квантовой механики. Туннельный эффект	10	
в) квантовая информатика, включающая квантовую криптографию и квантовый компьютер	6 (б, в, г)				

Рис. 1. Новейшие достижения физической науки и их связь с курсом физики в академии

Ниже в статье затронуты лишь некоторые вопросы, рассматриваемые в рамках внеаудиторной работы, которые должны расширить формирование научного мировоззрения обучающихся.

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ И БОЗОН ХИГГСА

Стандартная модель и бозон Хиггса относятся к темам «Магнитное поле постоянного поля», «Силовое действие магнитного поля», «Космическое излучение. Элементарные частицы» курса физики (п. 1, 2 перечня на рис. 1). Это господствующая теория микромира, многократно проверенная экспериментально, которая позволяет теоретически предсказать свойства многих различных процессов в мире элементарных частиц. Бозон Хиггса открыт в полном соответствии с теоретическими предсказаниями Стандартной модели и подтвержда-

ет состоятельность этой модели. Открытие новой частицы – бозона Хигса – это крупнейшее достижение физики начала XXI века. Историческая пресс-конференция, посвященная этому событию, проходила в крупнейшем в мире Международном центре экспериментальных исследований в области физики высоких энергий – Большом адронном коллайдере. Прямая трансляция велась десятками ведущих мировых средств массовой информации, к ней было приковано внимание миллионов людей, и мы являемся свидетелями одного из триумфов физики: 4 июля 2012 года считается открытием бозона Хигса.

Чтобы оценить масштабность открытия изложим некоторые положения.

В рамках Стандартной модели разработан механизм Хигса и хиггсовское поле, которое непосредственно влияет на движение частиц в космическом пространстве. Это поле слегка затормаживает частицы, делая их инертнее, т. е. придавая им массу. Таким образом, роль хиггсового поля и хиггс-бозонов чрезвычайно важна – они наделяют элементарные частицы определенной массой.

Появился термин – механизм Хигса. В основе его лежат скалярные поля с беспиновыми квантами – хиггсовские бозоны. Напряженность поля Хигса везде одинакова, в нем нет никаких силовых линий. Хиггсовское поле в каждой точке пространства определяется своей величиной и не имеет никаких выделенных направлений, в отличие от векторных полей электричества и магнетизма. Хиггсовское поле появилось вскоре после Большого взрыва; создатели Стандартной модели предположили, что это поле быстро распространилось по всей Вселенной, и оно влияет на движение частиц в космическом пространстве. Переносчик поля – бозон Хигса. Десятки лет ученые «охотились» за этой частицей, она была предсказана шотландским физиком Питером Хигсом в 1964 году. Академик В. Рубаков (Институт ядерных исследований РАН и Московский государственный университет) так «откликнулся» на событие, имеющее выдающееся значение для физики: «Речь идет об открытии одного из главных объектов фундаментальной физики, не имеющего аналогов среди известных элементарных частиц и занимающего уникальное место в физической картине мира».

В физике микромира решение многих проблем зависит от этого открытия. Физика элементарных частиц, изучающая микроскопические объекты, нуждается в гигантских исследовательских установках, где эти частицы ускоряются, сталкиваются, распадаются. Большой адронный коллайдер работал в 2012 году на энергии 8 ТэВ. Дальнейшее продвижение связано с существенным повышением точности измерений. Это означает необходимость строительства нового коллайдера с достижением более высоких энергий столкновения. После открытия бозона Хигса дальнейшее обоснование необходимости строительства нового коллайдера не требуется. Планируется построить суперколлайдер нового поколения с суммарной энергией столкновения 100 ТэВ! Сооружение коллайдера начнется после 2020 года.

ТЕОРИЯ СТРУН

Теория струн относится к теме «Космическое излучение. Элементарные частицы» курса физики (п. 3 перечня на рис. 1). В середине 70-х годов прошлого века физики пришли к мысли о том, что если в природе существуют еще более мелкие объекты, глюоны и кварки, то они должны быть связаны со струнами, которые не дают им разойтись на большие расстояния. Вскоре выяснилось, что такие жгуты напряженного поля могут существовать и сами по себе – как независимые «хромосомы мира». Согласно этой теории помимо трех хорошо известных пространственных измерений, есть еще шесть или семь, которые до сих пор никому не удалось заметить. Ученые полагают, что эти измерения компактно скручены наподобие пружин и «спрятаны» в глубине обычного пространства. Выявить их можно только при столкновении высокоэнергетичных частиц. Такие эксперименты планируется провести на сверхмощных ускорителях элементарных частиц.

Теория струн основывается на принципах квантовой механики [2, 3]. Все материальные объекты (в теории струн) взаимодействуют посредством гравитационных сил. Струны могут разрываться и слипаться, образуя при этом замкнутые струнные кольца и более сложные переплетающиеся фигуры. Куда может привести теория струн? Теорию струн удалось объединить с концепцией суперсимметрии. В результате появилась теория суперструн. На сегодняшний день эта теория более других продвинулась в плане объединения всех четырех основных взаимодействий сил, действующих в природе. Гипотеза великого объединения продолжает привлекать всех физиков мира.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ЧЕРНЫХ ДЫР

Голографический принцип черных дыр относится к темам «Дифракция света», «Элементы квантовой механики» курса физики (п. 5 перечня на рис. 1). В современной науке, связанной с черными дырами, можно выделить два вопроса: исчезает ли информация в черных дырах и в чем сущность голографического принципа черных дыр?

Знаменитому британскому физика С. Хокингу удалось доказать, что черные дыры постепенно «испаряются» [2, 3]. Здесь важно подчеркнуть, что это – квантовое явление и его нет в классической общей теории относительности. Вопрос о том, теряется ли информация в черных дырах, был спорным. Американский физик Леонард Сасскинд много лет спорил с Хокингом о природе черных дыр, доказывая, что «информация не умрет никогда». В 2004 году Хокинг признал свою ошибку. Дискуссии с Хокингом Сасскинд посвятил книгу «Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики» [4]. У нас книга вышла в 2013 году. Самое поразительное в этой книге то, что такой маститый ученый, как Сасскинд использует голографический принцип, утверждая, «что все находящееся внутри некоторой области пространства можно описать посредством битов информации, расположенных на ее границе».

Далее Сасскинд в своей книге показывает, что голографический принцип стал «повседневным рабочим инструментом». Тем не менее Сасскинд признает, что «добиться понимания голографического принципа – это, вероятно, самый большой вызов физикам со времен создания квантовой механики».

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

Гравитационные волны относятся к темам «Тяготение. Элементы теории поля» и «Интерференция света» курса физики (п. 4 перечня на рис. 1). Одним из вопросов, интересующих обучающихся, является проблема существования гравитационных волн. Из теории относительности Эйнштейна следует, что гравитационные волны существуют. Но они настолько малы по своей величине, что регистрация их представляет труднейшую механическую проблему. Большая масса и малый радиус орбиты способны увеличить мощность излучения. Гравитационное взаимодействие на сорок порядков уступает электрическому. Источником гравитационных волн служат любые движения материальных тел, приводящие к неоднородному изменению силы тяготения в окружающем пространстве. Смысл этого хорошо объясняется в книге О. Фейгена «Теория относительности» [5]. В частности, он отмечает, что для испускания волн тяготения необходимы ускорения, но не любые. Он говорит: «Цилиндр, который вращается вокруг своей оси симметрии, испытывает ускорение, однако его гравитационное поле остается однородным и волны тяготения не возникают. А вот, если раскрутить этот цилиндр вокруг другой оси, поле станет периодически изменяться и от цилиндра во все стороны побегут гравитационные волны». Там же указывается, что обычные звезды солнечного типа имеют слишком большой объем и малую плотность для эффектив-

ного испускания гравитационных волн. Источником гравитационных волн могут быть быстро вращающиеся одиночные нейтронные звезды. При вращении свыше тысяч оборотов в секунду нейтронная звезда теряет осевую симметрию, а вращающееся несимметричное тело излучает гравитационные волны. Еще более мощными источниками этих волн будут двойные черные дыры, плотность и масса которых больше, чем у нейтронных звезд. Короткие, но сильные всплески гравитационных волн, вероятно, возникают при взрывах сверхновых, которые тоже происходят несимметрично. Ученые полагают, что самым интересным источником гравитационного излучения должны быть космологические процессы. Сразу после «рождения» Вселенной гравитационные волны испускались хаотически движущимися неоднородностями вещества. Если бы удалось зарегистрировать реликтовые гравитационные волны, то мы получили бы информацию о первых секундах существования Вселенной. Наконец, 14 сентября 2015 года сигнал с постепенно увеличивающейся частотой и амплитудой был одновременно зафиксирован на двух антеннах LIGO (Laser Inter-ferometer Gravitational – Wave Observatory) в Вашингтоне и Луизиане. Это был сигнал гравитационного всплеска от слияния двух черных дыр, который шел до нас 1,3 млрд. лет. Эти дыры по массе превышали Солнце соответственно в 39 и 26 раз, вращались друг относительно друга с огромной скоростью, затрачивая на один оборот по несколько миллисекунд. Таким образом, ученым удалось подтвердить предсказания Эйнштейна, сделанные 100 лет назад: почувствовать гравитационные шумы Вселенной. Для этого необходимо было, кроме всего, добиться невероятной чувствительности приборов, позволившей почувствовать гравитационные волны.

Открытие существования гравитационных волн было возможно осуществить только с помощью лазерного интерферометра гравитационной обсерватории. В дальнейшем физики могут изучать столкновения нейтронных звезд. Полученные данные прольют свет на понимание ядерной физики и поведение вещества при сверхвысокой плотности. Лазерные интерферометры будут использованы при создании и эксплуатации сложных военных и космических систем.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ И НАНОТЕХНОЛОГИЯ

Полупроводниковые структуры и нанотехнология относятся к теме «Элементы квантовой механики» и «Основы зонной теории твердого тела. Полупроводники» курса физики (п. 6 а, б, в, из перечня на рис. 1). При изложении квантовой механики большой интерес вызывают вопросы применения ее на практике. Здесь следует отметить, что макроскопические квантовые явления – сверхтекучесть и сверхпроводимость, а также лазеры излагаются в существующих учебниках. В добавление к этим понятиям можно отнести полупроводниковые структуры и нанотехнологию.

В объектах в форме проводниковых структур полупроводниковый материал сознательно делается неоднородным, чтобы на созданных таким образом микроскопических неоднородностях возникли нужные квантовые эффекты. Можно конструировать одномерные и двумерные полупроводниковые структуры. Комбинации различных типов полупроводниковых структур служат основой информационных технологий. В 2001 году академик РАН Ж.И. Алферов за разработку полупроводниковых гетероструктур получил Нобелевскую премию.

На основе квантовых эффектов созданы приборы – туннельные и силовые микроскопы. Это позволило изучить структуру материалов с точностью до индивидуальных атомов и сконструировать материалы заданной структуры, что, в свою очередь, послужило причиной появления новых технологических возможностей, которые условно объединяются под именем нанотехнологии [6].

Сейчас в нанотехнологию вкладываются огромные материальные и интеллектуальные ресурсы. Важным направлением в нанотехнологии явилось создание углеродных нанотрубок. Диаметр такой трубки около одного нанометра (10^{-9} м), а длина может достигать несколько десятков микрон ($\sim 10^{-5}$ м). Межатомные связи, которые соединяют атомы углерода друг с другом, настолько сильны, что бездефектная углеродная трубка на два порядка прочнее стальной проволоки того же диаметра. В то же время она в четыре раза легче. Ясно, что на основе таких трубок можно создавать уникальные прочные и легкие конструкции. Кроме того, предполагается, что электрические кабели, сделанные из нанотрубок, при комнатной температуре будут иметь электрическое сопротивление на два порядка меньше медных.

Одним из приложений квантовой механики является развитие квантовой информатики, включающей квантовую криптографию и квантовый компьютер. Предмет квантовой криптографии – конструирование защищенных линий связи (для передачи секретной информации). А квантовые компьютеры смогут решать такие вычислительные задачи, которые не под силу обычным классическим компьютерам. Таким образом, в перспективе перед военными специалистами открываются небывалые возможности по созданию различных наноустройств: элементов механизмов нанороботов для использования в военной технике и космосе; нанодвигателей; магнитной памяти нового поколения (плотность памяти 10 гигабайт на квадратный сантиметр) и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены основные направления разработки новых физических идей, и дана краткая характеристика полученных при этом научных результатов. По мнению авторов, внедрение указанных достижений в процесс физического образования курсантов академии позволит существенно повысить не только уровень их фундаментальной подготовки в области современного естествознания, но и общий культурный уровень. Наиболее целесообразной формой реализации предлагаемых изменений является организация и проведение факультативных занятий по физике и подготовка научных докладов в кружках ВНО по указанным вопросам современной физики

Список используемых источников

1. Примерные программы дисциплины «Физика» Федерального компонента цикла общих математических и естественнонаучных дисциплин для ГОС 3-го поколения / Научно-методический совет по физике Министерства образования и науки Российской Федерации. – 2009. – 36 с.
2. *Стивен Хокинг* Теория Всего. Происхождение и судьба Вселенной. – СПб, Амфора, 2009. – 148 с.
3. *Стивен Хокинг, Роджер Пенроуз* Природа пространства и времени. – СПб, Амфора, 2007. – С. 50–78.
4. *Леонард Сасскинд* Битва при черной дыре. – СПб, Питер, 2013. – С. 287–342.
5. *Фейгин О.* Теория относительности. – М.: Эксмо, 2010. – С. 224–240.
6. *Менский М.* Человек и квантовый мир. – Фрязино: Век 2, 2007. – С. 89–118.

Р.Ф. Фаттахов,
кандидат военных наук;
А.А. Федирко,
кандидат военных наук

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ПСИХОДИАГНОСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В РАБОТЕ ПО УКРЕПЛЕНИЮ ВОИНСКОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Проведен анализ подходов к моделированию и предложен вариант обобщенной модели психодиагностического средства, определены этапы ее разработки и использования в ходе работы по укреплению воинской дисциплины. Авторами предложены возможные направления совершенствования работы по укреплению воинской дисциплины на основе проведения ряда организационных и технических мероприятий в сфере применения психодиагностических средств.

Ключевые слова: воспитательная работа, психодиагностическое средство, воинская дисциплина.

Командир, организуя воспитательную работу, должен исходить из того, что крепкая воинская дисциплина и уставной порядок являются главными условиями поддержания высокой боевой готовности и боеспособности Вооруженных сил Российской Федерации.

Практика повседневной деятельности войск показывает, что коренное укрепление воинской дисциплины и правопорядка является очевидным результатом напряженной и систематической воспитательной работы органов управления всех степеней [1].

Одним из основных направлений укрепления воинской дисциплины является психологическая диагностика личного состава. В общем смысле психологическая диагностика – это наука о конструировании методов оценки, измерения, классификации психологических и психофизиологических особенностей людей, а также об использовании этих методов в практических целях.

В настоящее время общепризнано, что применение психодиагностических средств, имеющих теоретическое обоснование и соответствующих установленным методическим критериям, связанным с целью непосредственной деятельности тех или иных воинских формирований, приводит к повышению эффективности работы по укреплению воинской дисциплины.

Под психодиагностическим средством в данной статье будем понимать научно-методический аппарат, определяющий приемы и правила деятельности субъекта диагностики, его взаимодействие с объектом, используемые математические зависимости и логические операции, рассматриваемый в единстве с материально-техническим обеспечением и предназначенный для измерения и оценки индивидуально-психологических особенностей людей.

Анализ подходов, сложившихся в практике психологической диагностики [2], позволил выделить две ее функции – научную и практическую. Первая характеризует психодиагностику как научно-исследовательскую область и представляет собой деятельность по конструированию психодиагностических средств. Вторая функция реализуется должностными лицами органов управления, использующими диагностические средства. Они измеряют, анализируют, оценивают качества, характеризующие личный состав и выявляют особенности функционирования подразделений воинской части.

Средства, которые используются в работе по укреплению воинской дисциплины, по степени формализации разделены на две группы (табл. 1).

Таблица 1

Виды и характеристика психодиагностических средств, используемых в работе по укреплению воинской дисциплины

Группа средств	Виды средств	Характерные признаки	Цель применения
Формализованные	Тесты, опросники, методики проективной техники, психофизиологические методики	Определенная регламентация, объективизация процедуры обследования или испытания (точное соблюдение инструкций, строго определенные способы предъявления стимульного материала, невмешательство субъекта в деятельность респондента и др.), стандартизация (т. е. установление единого образца проведения обработки и представления результатов диагностических экспериментов), надежность, валидность	Сбор диагностической информации в относительно короткие сроки в виде, который дает возможность количественно и качественно сравнивать респондентов между собой
Малоформализованные	Наблюдение, беседа, анализ результатов деятельности	Высокая трудоемкость (например, наблюдение за респондентом осуществляются иногда в течение нескольких месяцев), в большей степени основаны на профессиональном опыте, психологической подготовленности самого субъекта исследования, сильное влияние случайных и побочных факторов на результаты обследования, связанные с уровнем культуры проведения психологических наблюдений, бесед и анализа результатов деятельности	Сведения о респонденте, особенно когда предметом изучения выступают такие психические процессы и явления, которые мало поддаются объективизации (например, плохо осознаваемые субъективные переживания, личностные смыслы) или являются чрезвычайно изменчивыми по содержанию (динамика целей, состояний, настроений и т. д.)

Психодиагностические средства, предназначенные для решения различных классов диагностических задач, обладают рядом отличительных структурных особенностей, их можно классифицировать по четырем группам (рис. 1).



Рис. 1. Классы задач, решаемых с помощью диагностических средств

Разработанные и применяемые в работе по укреплению воинской дисциплины методики психодиагностики позволяют диагностировать личный состав по всем уровням, характеризующим личность.

Однако в практике повседневной деятельности войск многообразие методик изучения качеств личного состава (по разным подсчетам их количество достигает нескольких десятков

единиц) создало противоречие, заключающееся в затруднении получения адекватной и своевременной информации о подчиненных, а следовательно, и принятии решения на проведение мероприятий по укреплению воинской дисциплины. В связи с этим возникает актуальная задача, заключающаяся в необходимости разработки специализированной (предназначенной для конкретных потребностей войск) методики диагностирования личного состава.

Одним из наиболее перспективных направлений разрешения данного противоречия является применение комплексных методик, разработанных на основе обобщенной модели психодиагностических средств, предложенной авторами (рис. 2).



Рис. 2. Обобщенная модель психодиагностического средства:

1 – семантические правила «А»; 2 – правила измерения индикаторов; 3 – правила установления индикаторов; 4 – диагностические правила «А»; 5 – семантические правила «В»; 6 – правила измерения характеристик; 7 – диагностические правила «В»; 8 – правила «С» формулирования вывода

Проведенный анализ процесса формирования модели психодиагностического средства позволяет сделать вывод о необходимости разработки и использования такого психодиагностического средства, которое позволяет: решать различные диагностические задачи, корректировать структуру вопросов в зависимости от целей применения и в то же время не предъявлять жесткие требования к техническим средствам и квалификации субъекта исследования.

Рассмотрим вариант создания теста, имеющего цель сделать вывод об отношении военнослужащих к употреблению алкогольных напитков.

Основными индикаторами могут быть выводы: склонен к злоупотреблению алкоголем; равнодушен к алкоголю; может позволить, но не превышает разумной нормы.

Критериями измерения являются ответы на вопросы либо выбор респондентом одной из возможных формулировок ответов. Обобщение происходит на основании нескольких диагностических правил, например: если опрашиваемый склонен к употреблению алкоголя, употреблял часто и с последствиями, значит, он склонен к злоупотреблению. В этом случае респондент относится к классу потенциально возможных нарушителей воинской дисциплины и деятельность командиров должна быть направлена на профилактическую работу с таким военнослужащим.

В ходе применения формализованных методов правила установления индикаторов (стандартизированных вопросов или высказываний в единстве с ответами респондента) реализуются разработчиком теста на этапе его конструирования. Они заложены в перечне и формулировках вопросов (высказываний) и вариантах ответов, а также в инструкциях, регламентирующих условия тестирования, поведение объекта и субъекта исследования.

При использовании малоформализованных методов для установления индикаторов служат различные примерные описания некоторых проявлений, которые, по мнению их авторов, могут быть как-то связаны с исследуемыми психологическими характеристиками. В некоторых случаях эти описания дополняются достаточно условным и приблизительным перечнем ситуаций, в которых данные проявления могут иметь место.

В общем виде процесс психодиагностики с использованием рассмотренной выше модели показан на рис. 3.



Рис. 3. Применение психодиагностического средства

В то же время в практике применения психодиагностических средств сложились объективные противоречия, связанные с интерпретацией результатов исследования личного состава и использованием их в ходе повседневной деятельности командиров и начальников.

Основными причинами возникновения данного противоречия являются:

- отсутствие опыта проведения мероприятий психологической диагностики у первичного командного звена;
- значительные затраты времени на подготовку субъектов психологического обеспечения (командиров, начальников, органов управления, специалистов органов воспитательной работы) к проведению диагностики подчиненных;
- большая трудоемкость оценивания результатов тестирования;
- сравнительно короткий период времени нахождения военнослужащих, проходящих военную службу по призыву, в подразделении;
- незначительный «социальный» опыт должностных лиц уровня «взвод – рота» для принятия решения на корректировку хода воспитательной работы в подразделении.

Сложившееся противоречие обусловило актуальную задачу разработки новых подходов к изучению личного состава, позволяющих осуществлять диагностику подчиненных с высокой эффективностью.

По мнению авторов, такие подходы необходимо реализовывать на основе повышения эффективности двух элементов: субъектов и средств психологического диагностирования.

Гипотетически возможными направлениями разрешения данного противоречия в сфере совершенствования субъектов являются:

- подготовка должностных лиц, занимающих первичные сержантские и офицерские должности (уровень: командир отделения – заместитель командира роты), на экспресс-курсах в масштабе соединения с целью формирования навыков работы с психодиагностическими средствами [3];
- повышение квалификации должностных лиц среднего звена (уровень: командир батальона – командир части) на сборах в масштабе объединения с периодичностью не реже один раз в три года с целью ознакомления с передовыми средствами психологического диагностирования и доведения информации подчиненным должностным лицам;
- создание структуры психологического обеспечения на уровне военного округа (вида Вооруженных сил, рода войск) с функцией накопления и анализа результатов психологического диагностирования, подготовки предложений должностным лицам центральных органов военного управления в целях принятия решения на проверку и оказание помощи подчиненным воинским формированиям.

Возможными направлениями разрешения данного противоречия в сфере применения средств диагностирования являются:

- применение специальных методик, позволяющих комплексно диагностировать все структурные элементы модели личности;
- применение электронных вычислительных систем и комплексов, позволяющих снизить время на обработку результатов диагностирования и анализа [4];
- использование информационно-коммуникационных возможностей Центра управления повседневной деятельностью Национального центра управления обороной государства (НЦУОГ) с целью накопления массива данных и автоматизированной обработки полученной информации;
- использование моделей, аналогичных применяемым, в системах поддержки принятия решений (СППР), позволяющих формировать рекомендации по результатам диагностирования для принятия решения на дальнейшее совершенствование психологического обеспечения воспитательной работы с личным составом.

Вариант перспективной модели применения психодиагностического средства в системе управления, разработанный авторами, показан на рис. 4.

Наиболее перспективным направлением, по мнению авторов, является использование возможностей НЦУОГ в сопряжении с разработкой и внедрением СППР.

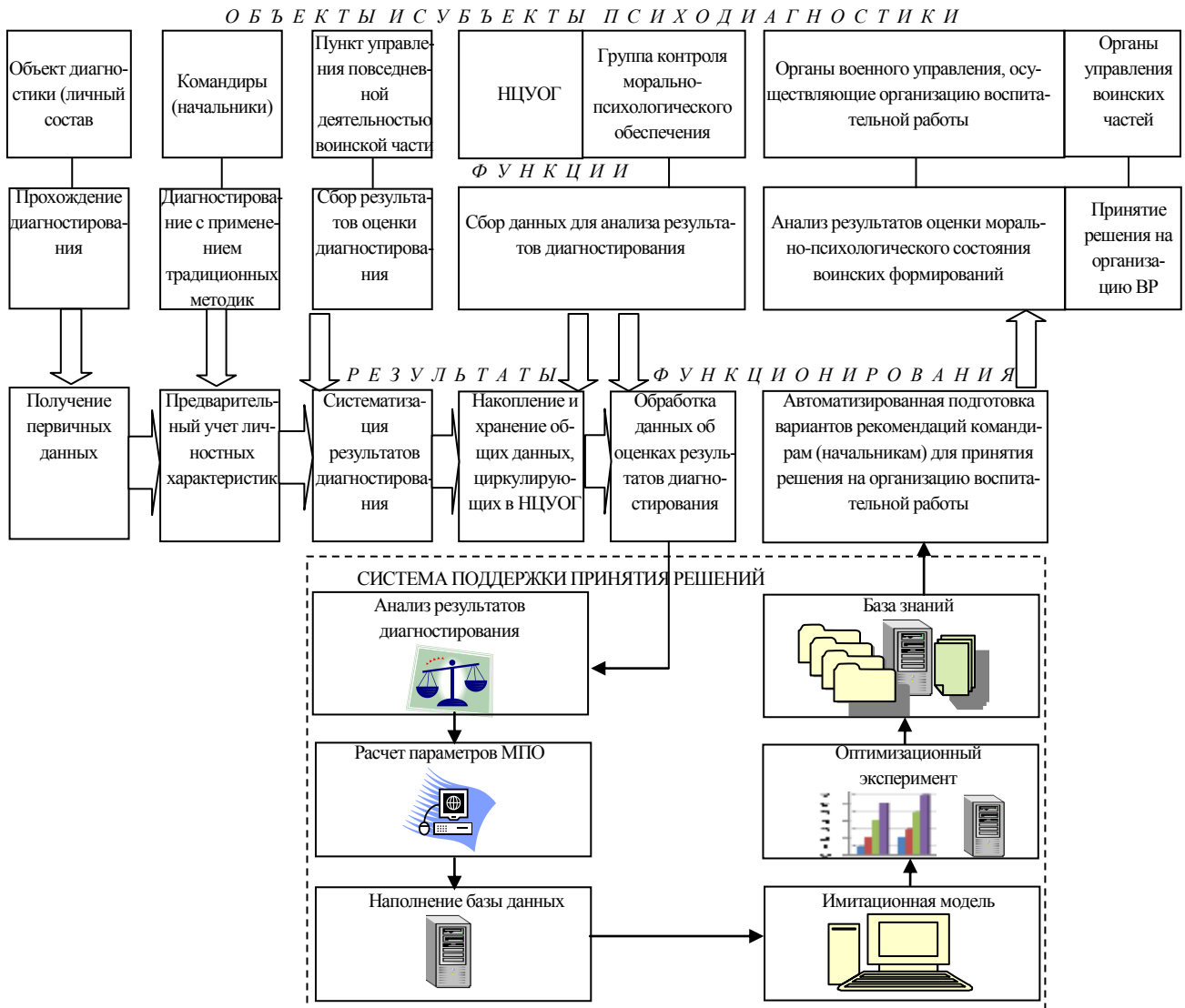


Рис. 4. Перспективная модель применения психодиагностических средств

Преимущества данного направления заключаются в следующем:

1. Значительно упрощаются фиксация и обработка ответов объекта исследования при одновременном снижении вероятности ошибок на данном этапе диагностики (которые при ручной обработке практически неизбежны) и, как следствие, повышается объективность результатов.
2. Резко увеличивается оперативность получения результатов диагностики.
3. Быстрый перевод полученных первичных данных по тестам в стандартные значения и наличие базовых вариантов интерпретации показателей освобождают пользователя от трудоемких рутинных операций.
4. Можно сравнить полученные результаты с несколькими выборками стандартизации теста (профессиональными, социально-демографическими, должностными и т. д.) для обеспечения более полной оценки личного состава.
5. Появляется возможность сопряжения диагностического инструментария с накоплением получаемой информации (функция базы данных) для последующей коррекции тестовых методик и осуществления эффективного поиска требуемой информации о личном составе.
6. Формируются рекомендации для принятия решений по организации воспитательной работы и руководству в ходе ее проведения.

Таким образом, возможным направлением повышения эффективности работы по укреплению воинской дисциплины является применение таких моделей психодиагностических средств, которые адаптируются под конкретные нужды исследования личного состава, позволяют накапливать информацию и представлять результаты диагностики в форме рекомендаций командирам (начальникам) подразделений на организацию работы по укреплению воинской дисциплины.

Предложенные подходы к разработке и применению средств психодиагностики позволяют распределить функциональные обязанности должностных лиц в данной сфере воспитательной работы, при этом оптимальное сочетание организационных и технических мероприятий на всей вертикали и горизонтали военного управления позволит повысить уровень морально-психологического состояния личного состава и, как следствие, боеготовность и боеспособность воинских формирований.

Список используемых источников

1. *Ануфриев А.Ф.* Психодиагностика: основы решения диагностических задач. – М.: Ось-89, 2012. – 144 с.
2. Основы применения Вооруженных Сил Российской Федерации и управление повседневной деятельностью войск. Основы управления войсками: учеб. пособие / А.Б. Пауков, В.Л. Кабалин, Н.В. Курдай и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Ч. II: Управление повседневной деятельностью воинских частей. – 230 с.
3. *Бурлачук Л.Ф.* Психодиагностика: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2012. – 384 с.
4. *Мельничук А.С., Сергеев В.А.* Современные компьютерные системы психологической диагностики. – URL: http://studme.org/37673/psihologiya/kompyuterizatsiya_psihologicheskoy_diagnostiki (дата обращения: 07.06.2016).

И.Н. Некрасов,
кандидат техн. наук;

Р.А. Ситков,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭКСПЕРТОВ, ПРИВЛЕКАЕМЫХ К РАБОТЕ В СОСТАВЕ РЕКОГНОСЦИРОВОЧНЫХ КОМИССИЙ

В работе проанализирован существующий подход к формированию экспертных комиссий, направляемых для проведения рекогносцировочных обследований. На основе выявленных недостатков предложена методика оценивания качества экспертов, привлекаемых к работе в составе рекогносцировочных комиссий. Приведены практические рекомендации по использованию данной методики.

Ключевые слова: эксперт, рекогносцировочная комиссия, специалист, вербально-числовая шкала Харрингтона, свойства эксперта.

Важнейшей задачей при проведении рекогносцировочных изысканий (РИ) является выбор из множества рассмотренных участков местности (УМ) лучшего с точки зрения его соответствия техническим и экономическим требованиям на строительство объектов специального назначения (ОСН) Космических войск (КВ). Учитывая стоимость возводимых ОСН (сотни миллионов и миллиарды рублей), а также важность решаемых ими задач для обороноспособности страны (предупреждение о ракетном нападении, контроль космического пространства и др.), правильность принимаемого решения имеет огромное значение. Расходы на строительство и эксплуатацию ОСН, а также эффективность их применения по назначению во многом зависят от места их размещения.

Выбор места дислокации ОСН, в свою очередь, зависит от ряда факторов:

- качества выполнения оперативно-тактического обоснования на размещение ОСН, предварительного выбора УМ для его размещения;
- правильности составления технического задания (ТЗ) на проведение РИ, полноты отражения в нем вопросов, непосредственно влияющих на уровень раскрытия технического потенциала возводимого ОСН, а также на стоимость его строительства и эксплуатации;
- наличия УМ, удовлетворяющих необходимым требованиям к размещению на них ОСН в заданном районе;
- полноты и достоверности данных, собранных при проведении РИ;
- качества анализа собранных при проведении РИ данных, обоснованности решения о выборе конкретного участка из множества рассмотренных.

Рассмотрим подробнее последний из перечисленных выше факторов. Очевидно, что качество анализа собранных данных прямо определяется персональным составом рекогносцировочных комиссий (РК). Иначе говоря, если для рассмотрения вопросов, связанных с энергоснабжением ОСН, привлекается энергетик – это одна ситуация, а если в составе РК его нет и этот вопрос решает, например, связист – то другая. Кроме того, на результат анализа влияет не только наличие или отсутствие необходимого специалиста, но и его личные качества.

Опыт участия в работе РК показывает, что требование нормативных документов о выделении от заинтересованных организаций в состав комиссий, проводящих РИ, специалистов по соответствующим направлениям, часто не выполняется.

Причины, по которым это происходит, разнообразны. Это и отсутствие необходимых специалистов как таковых, и невозможность выделить имеющихся специалистов ввиду их заня-

тости (либо невозможность выделить высококлассных специалистов, которые, как правило, более востребованы, чем их менее компетентные коллеги). Свою роль играет и общее отношение к проведению РИ как к досадному отвлечению от основной работы соответствующей организации. В этой связи актуальным становится вопрос оценки качества специалиста (эксперта), привлекаемого к участию в работе РК, для чего требуется разработка соответствующей методики. При этом важно, чтобы разрабатываемая методика была проста и легка в использовании, иначе она не сможет прочно войти в практику РИ.

Известно, что качество специалиста определяется такими его свойствами, как компетентность, уверенность, объективность, деловитость и заинтересованность [1, 2]. Оценивание этих свойств является трудной задачей. Во-первых, из-за комплексного характера этих свойств, каждое из которых состоит из ряда других свойств (рис. 1). Во-вторых, психофизиологические особенности человека, от которых в значительной степени зависит успешное исполнение им обязанностей эксперта, изучены еще недостаточно [2].

Из схемы, изображенной на рис. 1, видно, что для количественной оценки качества эксперта нужно прежде всего получить частные оценки отдельных свойств, от которых это качество зависит.



Рис. 1. Свойства, характеризующие качество эксперта

Большинство существующих методов оценки качества экспертов можно разделить на пять групп [1, 2]:

- 1) эвристические – оценки, назначаемые человеком;
- 2) статистические – оценки, полученные в результате обработки суждений экспертов об объекте оценки;
- 3) тестовые – оценки, полученные в результате специальных испытаний экспертов;
- 4) документальные – оценки, основанные на анализе документальных данных об экспертах;
- 5) комбинированные – оценки, полученные с помощью любой совокупности перечисленных методов.

Каждая из названных групп включает несколько частных оценок и методов их получения (рис. 2).

Предлагаемая методика носит комбинированный характер, совмещая в себе эвристический и документальный методы. Она позволяет определять такие свойства эксперта, как компетентность, деловитость и заинтересованность (рис. 3).

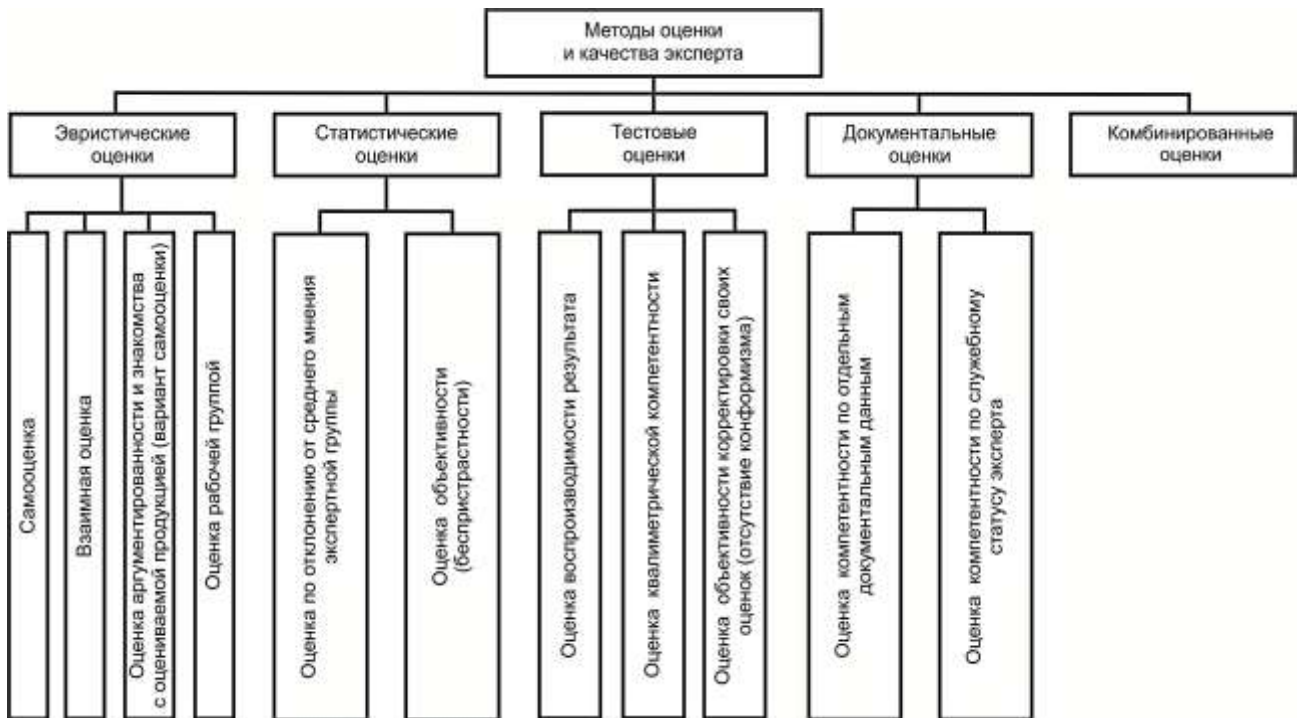


Рис. 2. Методы получения частных оценок свойств, характеризующих качество экспертов

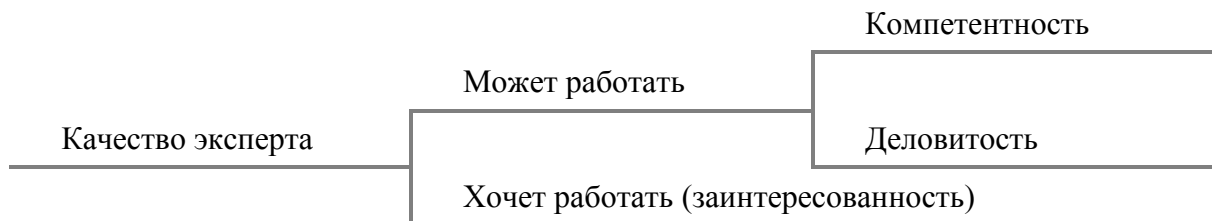


Рис. 3. Свойства, характеризующие качество эксперта при упрощенном способе оценивания качества

Объективность эксперта исключена из рассмотрения, так как это свойство является одним из самых сложно оцениваемых (надежных, а тем более простых методов ее определения пока не разработано). Уверенность эксперта на этапе отбора также не определяется, она оценивается самим экспертом после знакомства с имеющейся информацией и вынесения им суждения на ее основе.

Реализуется методика в виде анкеты, рассылаемой в заинтересованные организации на этапе формирования РК. При этом компетентность эксперта определяется по следующей формуле:

$$K_{\text{комп}} = \frac{K_{\text{к.ном}} + K_{\text{к.нач}}}{2}, \quad (1)$$

$$\text{где } k_{\text{ном.комп.}} = k_{\text{обр}} w_{\text{обр}} + k_{\text{нк.ст}} w_{\text{нк.ст}} + k_{\text{нк.зв}} w_{\text{нк.зв}} + k_{\text{должн}} w_{\text{должн}} + k_{\text{стаж}} w_{\text{стаж}} + k_{\text{инф}} w_{\text{инф}} \quad (2)$$

$K_{\text{к.ном}}$ – номинальный уровень компетенции;

$K_{\text{к.нач}}$ – оценка уровня компетенции эксперта со стороны начальника;

$k_{\text{обр}}$ – коэффициент образования;

- $k_{нк.ст}$ – коэффициент научной квалификации, ученая степень;
 $k_{нк.зв}$ – коэффициент научной квалификации, ученое звание;
 $k_{должн}$ – коэффициент должности;
 $k_{стаж}$ – коэффициент стажа;
 $k_{инф}$ – коэффициент источника информации;
 $w_{обр}$ – вес коэффициента образования;
 $w_{нк.ст}$ – вес коэффициента научной квалификации, ученая степень;
 $w_{нк.зв}$ – вес коэффициента научной квалификации, ученое звание;
 $w_{должн}$ – вес коэффициента должности;
 $w_{стаж}$ – вес коэффициента стажа;
 $w_{инф}$ – вес коэффициента источника информации.

Относительные веса w_i факторов, влияющих на качество эксперта, определяются из табл. 1. Значения коэффициентов факторов k_i , влияющих на номинальную компетентность эксперта, и их относительные веса w_i определяются из табл. 2.

Таблица 1

Веса факторов, влияющих на качество эксперта

Свойство эксперта	Вес, w_i
Компетентность	0,46
Деловитость	0,12
Заинтересованность	0,42

Таблица 2

Факторы, влияющие на номинальную компетентность эксперта

Фактор	Вес фактора	Значение фактора		
		низкий уровень	средний уровень	высокий уровень
Образование, $k_{обр}$	$w_{обр} = 0,41$	Высшее образование (ВО)	ВО и курсы повышения квалификации	ВО и военная академия (второе ВО)
		0,76	0,83	1
Научная квалификация, ученая степень, $k_{нк.ст}$	$w_{нк.ст} = 0,11$	Уч. степень отсутствует	Кандидат наук	Доктор наук
		0	0,77	1
Научная квалификация, ученое звание, $k_{нк.зв}$	$w_{нк.зв} = 0,09$	Уч. звание отсутствует	Доцент	Профессор
		0	0,78	1

Окончание табл. 2

Фактор	Вес фактора	Значение фактора		
		низкий уровень	средний уровень	высокий уровень
Должность, $k_{\text{должн}}$	$w_{\text{долж}} = 0,07$	Начальник лаборатории, старший научный сотрудник отдела, старший преподаватель, преподаватель	Начальник (зам. нач.) кафедры (отдела), профессор кафедры доцент,	Начальник (зам. нач.) управления
		0,64	0,82	1
Стаж, $k_{\text{стаж}}$	$w_{\text{стаж}} = 0,14$	До 5 лет	От 5 до 10 лет	Свыше 10 лет
		0,47	0,78	1
Источник информации, $k_{\text{инф}}$	$w_{\text{инф}} = 0,18$	Интуиция эксперта	Опыт работы по данному направлению	Проведение исследований по данному направлению
		0,48	0,89	1

Компетентность, деловитость и заинтересованность определяются непосредственным начальником эксперта с помощью вербально-числовой шкалы (ВЧШ) Харрингтона (табл. 3). Для чего он проставляет соответствующие его внутренней оценке значения этих свойств у эксперта: $k_{\text{к.нач}} = \underline{\hspace{2cm}}$, деловитость $k_{\text{дел}} = \underline{\hspace{2cm}}$ и заинтересованность $k_{\text{заинт}} = \underline{\hspace{2cm}}$ из соответствующего диапазона табл. 2.

Таблица 3

Вербально-числовая шкала Харрингтона

№ п/п	Описательная интенсивность оцениваемого показателя	Числовое значение
1	Очень высокая	$0,8 \leq A < 1,0$
2	Высокая	$0,64 \leq A < 0,8$
3	Средняя	$0,37 \leq A < 0,64$
4	Низкая	$0,2 \leq A < 0,37$
5	Очень низкая	$0,0 \leq A < 0,2$

Качество эксперта в целом определяется по формуле

$$Q_{\text{эксп}} = k_{\text{комп}} w_{\text{комп}} + k_{\text{дел}} w_{\text{дел}} + k_{\text{заинт}} w_{\text{заинт}}, \quad (3)$$

- где $k_{\text{комп}}$ — компетентность эксперта;
 $k_{\text{дел}}$ — деловитость эксперта;
 $k_{\text{заинт}}$ — заинтересованность эксперта;
 $w_{\text{комп}}$ — вес коэффициента компетентности эксперта;

- $w_{\text{дел}}$ – вес коэффициента деловитости эксперта;
 $w_{\text{заинт}}$ – вес коэффициента заинтересованности эксперта.

Все значения коэффициентов, используемые в методике, а также их относительные веса были определены в ходе серии экспертных опросов с привлечением значительного количества сотрудников академии из числа научных сотрудников и профессорско-преподавательского состава.

Основным достоинством предлагаемой методики является простота использования, что выгодно отличает ее от множества других методик, применяемых для оценивания качества специалистов в различных областях [2, 4]. Основным предназначением методики является не столько установление фактического качества и компетентности привлекаемых к работе в составе РК экспертов, сколько отсеивание от участия в них явных дилетантов и лиц, прямо не заинтересованных в данной работе (допустимым уровнем заинтересованности можно считать отсутствие у эксперта нежелания такого участия [3]).

Важным условием успешного использования методики является установление порогового значения качества эксперта либо только его номинальной компетентности (так как в этом случае затрудняется возможность «подтянуть» качество эксперта до требуемого уровня за счет субъективно назначаемых его начальником оценок заинтересованности и деловитости). Обоснование такого порога является отдельной задачей, однако на начальном этапе в качестве отправной точки можно назначить следующие значения коэффициентов:

- $K_{\text{к.ном}} > 0,51$ – превышение минимально возможной номинальной оценки компетентности, которую можно получить, используя табл. 1;
- $k_{\text{к.нач}} > 0,64$ – высокая оценка по ВЧШ;
- $k_{\text{дел}} > 0,5$ – средняя оценка по ВЧШ;
- $k_{\text{заинт}} > 0,5$ – средняя оценка по ВЧШ.

Отталкиваясь от приведенных «пороговых» значений коэффициентов, а также полученных в ходе экспертного опроса весов отдельных коэффициентов, можно получить следующее значение минимально допустимой компетентности эксперта по формуле (1):

$$K_{\text{комп}} > \frac{K_{\text{к.ном}} + K_{\text{к.нач}}}{2} > \frac{0,51 + 0,64}{2} > 0,575.$$

Качество эксперта в целом – по формуле (3):

$$Q_{\text{эсп}} > k_{\text{комп}} w_{\text{комп}} + k_{\text{дел}} w_{\text{дел}} + k_{\text{заинт}} w_{\text{заинт}} > 0,575 \cdot 0,46 + 0,5 \cdot 0,12 + 0,5 \cdot 0,42 > 0,5345.$$

Оценки компетентности и качества эксперта, рассматриваемого в качестве потенциального члена РК, должны быть больше рассчитанных по формулам 1 и 3 пороговых значений. Реализацию данной методики рассмотрим на примере.

Пример. На этапе формирования рекогносцировочной комиссии в организацию направляется уведомление о необходимости выделения в ее состав специалиста соответствующего профиля. Отбор предлагается осуществить на основе использования вышеуказанной методики.

Руководство организации рассматривает трех кандидатов, которые потенциально могут войти в состав РК. Характеристики кандидатов, полученные на основе методики, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики (свойства) кандидатов организации

Характеристики (свойства) кандидата	Вес	Оценка характеристики (свойства)		
		Кандидат 1	Кандидат 2	Кандидат 3
Факторы, влияющие на номинальную компетентность эксперта				
Уровень образования	0,41	0,76	0,83	0,76
Научная квалификации, ученая степень	0,11	0,77	1	0
Научная квалификация, ученое звание	0,09	0,78	1	0
Должность	0,07	1	1	0,64
Стаж работы	0,14	1	1	0,47
Источник информации	0,18	0,89	1	0,48
Оценка свойств эксперта его непосредственным начальником				
Компетентность	0,46	0,8	1	0,6
Деловитость	0,12	0,7	0,7	0,5
Заинтересованность	0,42	0,7	0,5	0,5

Пользуясь формулой (2) и данными, приведенными в табл. 4, находим значения номинальной компетентности кандидатов:

$$k_{\text{НОМ.КОМП } 1} = 0,41 \cdot 0,76 + 0,11 \cdot 0,77 + 0,09 \cdot 0,78 + 0,07 \cdot 1 + 0,14 \cdot 1 + 0,18 \cdot 0,89 = 0,8367;$$

$$k_{\text{НОМ.КОМП } 2} = 0,41 \cdot 0,83 + 0,11 \cdot 1 + 0,09 \cdot 1 + 0,07 \cdot 1 + 0,14 \cdot 1 + 0,18 \cdot 1 = 0,9303;$$

$$k_{\text{НОМ.КОМП } 3} = 0,41 \cdot 0,76 + 0,11 \cdot 0 + 0,09 \cdot 0 + 0,07 \cdot 0,64 + 0,14 \cdot 0,47 + 0,18 \cdot 0,48 = 0,5086.$$

По формуле (1) определяем оценку компетентности каждого кандидата:

$$K_{\text{КОМП } 1} = \frac{0,8367 + 0,8}{2} = 0,81835 \approx 0,82;$$

$$K_{\text{КОМП } 2} = \frac{0,9303 + 1}{2} = 0,96515 \approx 0,97;$$

$$K_{\text{КОМП } 3} = \frac{0,5086 + 0,6}{2} = 0,5543 \approx 0,55.$$

Определим качество кандидатов в целом по формуле (3):

$$Q_{\text{ЭКСП } 1} = 0,81835 \cdot 0,46 + 0,7 \cdot 0,12 + 0,7 \cdot 0,42 = 0,754441 \approx 0,75;$$

$$Q_{\text{ЭКСП } 2} = 0,96515 \cdot 0,46 + 0,7 \cdot 0,12 + 0,5 \cdot 0,42 = 0,737969 \approx 0,74;$$

$$Q_{\text{ЭКСП } 3} = 0,5543 \cdot 0,46 + 0,5 \cdot 0,12 + 0,5 \cdot 0,42 = 0,524978 \approx 0,52.$$

Результаты расчета (табл. 5) показывают, что из трех кандидатов один (кандидат №3) не «дотягивает» до установленных пороговых значений по всем оцениваемым показателям. Соответственно, он должен быть исключен из дальнейшего рассмотрения. Оставшиеся два кандидата преодолевают установленный уровень и могут быть включены в состав РК. При этом, несмотря на то, что компетентность кандидата №2 заметно превышает компетентность кан-

дидата №1 (0,97 и 0,82), его качество незначительно уступает качеству первого кандидата (0,74 и 0,75) ввиду отсутствия выраженной заинтересованности участвовать в работе РК.

Таблица 5

Итоговая оценка кандидатов

Характеристика	Кандидат 1	Кандидат 2	Кандидат 3
Компетентность номинальная	0,8367	0,9303	0,5086
Компетентность	0,82	0,97	0,55
Качество кандидата	0,75	0,74	0,52

Соответственно, если отталкиваться только от компетентности, то в состав РК предпочтительней было бы выделить кандидата №2, но если рассматривать и другие качества, то предпочтение следует отдать кандидату №1.

Вывод. Приведенный пример показывает, что разработанная методика позволяет достаточно четко оценить качество специалистов, привлекаемых к участию в рекогносцировочных изысканиях. В силу своей простоты методика не претендует на большую точность, однако главную задачу (отсеять от участия в РИ случайных людей) она решить вполне способна и может быть внедрена в практику формирования РК при подготовке и проведении РИ.

Список используемых источников

1. *Азгальдов Г.Г., Костин А.В., Садовов В.В.* Квалиметрия для всех: учеб. пособие. – М.: ИД ИнформЗнание, 2012. – 165 с.
2. *Райхман Э.П., Азгальдов Г.Г.* Экспертные методы в оценке качества товаров. – М.: Экономика, 1974. – 151 с.
3. *Азгальдов Г.Г.* Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.
4. *Кудрина В.Г., Липатова Е.Л., Гончарова О.В.* Экспертные оценки в здравоохранении – М.: РМАПО, 2010. – 39 с.

Abazina E.S., Erunov A.A. The comparative analysis and classification of methods digital and computer steganography and perspective directions of its development // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 5–16.

There are basic concepts and definitions of digital steganography and questions of not settled-terminology in this sphere in the article. Basic publications of digital steganography are defined by authors. The specified classification of its directions and methods (taking into account publications of last 5 years) and basic directions and works of perspective researches in this sphere are presented there.

Key words: steganography, the hidden channels, digital watermarks, fractal wide-band signals, pseudo-casual sequences, genetic algorithms, cellular automatic machines, management of the hidden capacity, multichannel stegosystems.

Approach to the study of structural and functional reconfiguration of the motion control system of the spacecraft / K.L. Grigoriev, A.U. Kulakov, S.A. Osipenko, A.N. Pavlov, A.A. Slinko // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 17–23.

In the framework of the theory of proactive management of structural dynamics of complex objects, it is important to consider problems of improving the structural and functional stability of the target application space of the apparatus in order to increase the period of their active existence. The article considers the approach to the study of structural and functional reconfiguration of complex objects on the example of the motion control system of the spacecraft, and also provides a practical implementation of the developed approach.

Key words: the motion control system of the spacecraft, proactive management, genome structure, criticality of failures, the structural and functional reconfiguration.

Zabuzov V.S, Kazantsev D.I. Methods of increasing the efficiency of the monitoring process of the technical state of information-telecommunication networks // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 24–33.

The problem of increasing the efficiency of the monitoring information and telecommunications network. The method of increasing the efficiency of determining the technical condition of the info-telecommunication network, based on the information and the time of the network model and generate dynamic monitoring program.

Key words: information-telecommunication network, improvement of the monitoring process, the MIB.

Discrete messages communication theory development and application to the fading signals channel based on the multidimensional reduced probability measure / V.V. Zvonarev, A.S. Popov, V.A. Pryakhin, A.M. Shaymardanov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016 – Release 655. – P. 34–39.

Approaches to resolving conflicts in discrete message transfer theory in the fading channel signals are considered. Conflicts caused by discrepancies adopted a one-dimensional probabilistic model, which is not takes into account the dynamics of the random process of fading. Channel quality indicator in conditions of fading, which uses a multi-dimensional model of the reduced probability, is proposed and justified.

Key words: fading signals, multidimensional reduced probability measure, discrete messages, duration of the interval of correlation, autocorrelation function.

Pavlov A.R., Toporkov N.S. Method of radio resource dynamic distribution of the satellite network based on non-uniform traffic // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 40–47.

The article discusses the possibility of providing multiple access to the radio resource of the satellite repeater with the allocation of channels on demand based on reservations. Explores models with fixed and dynamically changeable amount of the reserve channel capacity of a satellite transponder.

Key words: radio resource, dynamic redundancy, satellite.

Rationale parameters of the orbit spacecraft for increasing the number of flying over the area of the Earth surface / N.A. Averkiev, S.A. Vlasov, V.V. Kiselev, V.V. Salov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016 – Release 655. – P. 48–53.

The methodical approach to determine the size of the orbits of spacecraft in which the satellite moves with an increased number of crossings over a given area of the Earth's surface. The conditions are only necessary, the implementation of which can increase the number of crossings over a given area in the range of repeatability of the satellite flight path, as well as presented the iterative process of determining the numbers p and of q , characterizing the quasi-synchronous orbit.

Key words: review bandwidth characteristic of the latitude, the spacecraft flight path, a quasi-synchronous orbit.

Statistical estimation of the probability of occurrence of icing in the atmosphere, based on the schema of a combination of conditions / S.G. Alekhin, Y.V. Kuleshov, A.A. Turkin, V.A. Shemelev // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 54–69.

Military meteorology is one of the urgent problems is the problem of predicting meteorological conditions on the territory where there is no possibility of instrumental meteorological observations. One of the most difficult to predict phenomena in the atmosphere is the icing of aircraft.

The existing scientific and methodological apparatus allows to forecast the probability of occurrence of icing in the atmosphere, or indirectly, with verification of compliance of calculated climate variables air temperature, dew point temperature and the height of lower border of cloudiness some conditions the presence/absence of icing, or by using the methods of regression analysis by constructing a discriminant function that separates the cases of moderate or severe icing from cases of icing in the clouds.

The authors investigated the advantages and disadvantages of both methods and proposed a new physical-statistical model based on the schema of combination of conditions.

Key words: icing of aircraft, the physical-statistical model, discriminant analysis, a combination of conditions.

Besedin S.M., Kukushkin M.A., Ponomarev D.Y. Technique of definition of preferable variants of orbital construction of perspective satellite communication systems on the basis of use of locally-stationary orbits // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 70–75.

The summary. The technique of ballistic designing of satellite communication systems in locally-stationary orbits taking into account demanded level of target application of projected satellite communication systems is presented.

Key words: Satellite communication systems.

Synthesis of orbital structure of systems of spacecrafts of remote sensing of earth with use ballistic related groups of spacecraft / S.A. Vlasov, A.T. Zhatkin, T.A. Zhitnikov, A.V. Kulvits // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 76–81.

The question of orbital creation of systems of spacecrafts with use in ballistic related groups is considered. Conducted the calculation and analysis of some of the characteristics of ballistic constraint group of spacecraft under the influence of disturbing factors.

Key words: spacecraft, orbital constellation, ballistic constraint group, periodic review of the Earth surface.

Volkov V.F., Gigulin U.A., Tolmachev A.A. Substantiation of requirements to parameters information contour of system ballistic maintenance of application space systems on the basis of the principle double randomization // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 82–87.

In article two approaches to a substantiation of structure of system of information support (SIS) at which realisation the problem of ballistic maintenance of organizational-technical systems (OTS) гарантированно is carried out for set time with the set probability are offered. The first approach is based on the account of specificity of movement of active mobile objects (AMO), entering into structure OTS. The second approach considers indistinct character of requirements to results of functioning SIS, inevitable for early stages of life cycle OTC.

Key words: the rational structure, the guaranteed probability, the stochastic indicator, measurement errors, ballistic data, management work cycle, the plan of appointments.

The definition of canonical parameters transponders the reference signals of the reference stations / R.V. Volkov, S.R. Malushev, V.V. Sevidov, A.N. Simonov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 88–92.

Noted the underlying premise of the system developed location of earth stations. The urgency of definition of canonical parameters transponders in the interests of establishing such a system. A block diagram of disclosed algorithms determine the coordinates and motion parameters transponders on the reference signals of reference stations. Indicates the direction for further research.

Key words: complex of radio monitoring, satellite repeater, reference station, the canonical settings, positioning, total-distance measuring method, iterative algorithm, Taylor series, differential Doppler measurement.

Golovanskikh I.G., Petukhov A.M., Matveev S.A. Algorithm of method substantiation placing management stations when performing tasks observing of dynamic emergencies by space system of remote sensing // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 93–96.

The article presents the algorithm of method substantiation placing management stations when performing tasks observing of dynamic emergencies by space system of remote sensing is examined, as the basis of method selection justification of districts their location.

Key words: space system, spacecraft remote sensing of the Earth.

Glebov A.V., Gorbulin V.I., Miheev O.Y. Ballistic substantiation of application of mobile means of deducing for operative expansion of orbital grouping of small space vehicles // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 97–106.

The technique of definition of rational structure of mobile formation and ways of use of its functional divisions which proceeding from features of start of small space vehicles mobile means of deducing, space vehicle and carrier rocket characteristics allows to carry out a choice on the set (possible) set of areas of an arrangement of functional divisions those areas which are optimum located on ballistic conditions for maintenance of creation of demanded orbital grouping in target dates is developed.

Key words: the small space vehicle, deducing means, the carrier rocket, mobile starting platforms, a space-rocket complex, functional division of formation on deducing of companions.

Fall areas calculation problems of launch vehicle separable modules / S.A. Elisseykin, V.A. Podrezov, A.M. Poluarshinov, N.V. Shirshov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 107–113.

Fall areas minimum dimensions estimation questions of launch vehicle separable modules are considered in the article. This estimation is carried out by accurate calculating module definition and their movement at the atmosphere due to the real fall spots data and by using detailed methods of application during launch data preparation including on-line information.

Key words: fall area, real fall spots, separable module, launch vehicle, atmosphere parameters variations, statistical estimations, standard atmosphere, atmosphere local model.

Zotkin M.U., Mironov V.I. Application of the method of the approached correcting operator for the calculation program control the angular turning of the spacecraft with a constant vector of control points // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 114–121.

This paper considers the problem of determining the control program of the spatial angular sweep of dynamically asymmetric spacecraft with a finite vector of control points when the control is in three channels at the same time using the kinematic equations in the parameters of Rodrigues – Hamilton. The proposed algorithm is based on the application of the method of the approached correcting operator. Numerical results illustrating the convergence and high efficiency from a computational point of view.

Key words: spacecraft, the method of the approached correcting operator, the parameters of Rodrigues-Hamilton, Newton method.

Kolesnikov K.G., Masalkin A.A., Moskvina B.V. Model of planning application of spacecrafts of Earth remote sensing // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 122–127.

This article presents a model of planning application of spacecrafts of Earth remote sensing. There are considered various options for setting objectives depending on the indicator of the quality system proceeding.

Key words: spacecraft, planning application, sustainable plan, Earth remote sensing.

Polivanov V.A., Tarasevich K.O. Integrated approach to ensuring stability of ballistic structure of orbital group of spacecrafts of remote sensing of Earth // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 128–133.

Questions of maintenance of ballistic structure of orbital group of spacecrafts of remote sensing of Earth on a long interval of time are considered.

Key words: spacecraft, orbital constellation, periodic review.

Synthesis of systems of allocation and conversion flows with the set reliability level / E.V. Basotin, Y.A. Gravchenko, B.K. Grankin, V.V. Kozlov, I.O. Kukushkin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 134–139.

The algorithm for the synthesis of systems of allocation and conversion flows based on calculation of probability of no-failure operation of system at a stage of development of its structure is offered. The algorithm is realized by the analysis of adjacency matrix of a system graph and insertion of additional tops with reservation of elementary conversion function of a working environment of system.

Key words: synthesis, flow, reliability, probability of no-failure operation, adjacency matrix, columns, block diagram of reliability.

Models of emergency functioning air-hydraulic System of the space rocket refueling equipment Complexes / E.V. Basotin, Y.A. Gravchenko, B.K. Grankin, V.V. Kozlov, D.V. Sulaberidze // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 140–149.

The Task of ensuring operability of the Space Rocket refueling Equipment complexes in emergency operating Conditions is considered. Substantiates necessity and opportunity of the project analysis emergency Conditions. Showing methods of Emergency Conditions numbering to substantiate the claims to Diagnostic Tool Control as well to the Training-Simulated Complexes for testing Service staff Actions in emergency operating conditions.

Key words: refueling Complex, emergency Situation, emergency operating conditions, Functioning tree, Matrix of Structure, Matrix of operating.

Mathematical model of functioning of recognition system / R.A. Gudaev, V.O. Korolev, D.A. Rogov, S.E. Shaldaev // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 150–156.

A mathematical model of functioning of recognition system has been proposed in this article.

Key words: model, recognition, signs, entropy.

Fominov I. V., Korolev S.Y. Algorithm initial exhibition of the spacecraft-robot to perform a flyby of the orbital object // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 157–161.

This paper considers a theoretical approach to the solution of actual problems of ensuring the initial exhibition of the spacecraft-robot to perform a flyby for diagnosing the technical condition of the orbital object. The algorithm for determining the relative parameters of navigation and movement control during the initial exhibition of the spacecraft-robot is based on the use of traditional measuring instruments and optical camera mounted on board the spacecraft-robot.

Key words: spacecraft-robot, flyby of orbital object, the initial exhibition.

Shevchenko A.V., Yriev A.S. Interaction jet agencies aircraft traffic control with uneven hypersonic flow // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 162–171.

The interaction of jet aircraft controls movement with uneven hypersonic flow. With the help of numerical methods studied the possibility of motion control and flow around the aircraft using the system fan jets mounted on the bottom of the aircraft.

Key words: aircraft, hypersonic flow, numerical simulation.

Bykova A.N., Jasnova N.S. Distinctive features of communicative competence formation in teaching foreign languages by military education // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 172–176.

This article deals with some ways of overcoming the main difficulties of the military translation, i. e. the most effective exercises. The exercise descriptions are accompanied by scientific and methodic explanations.

Key words: military-professional speech competence; functional dominants; cognitive information; microcontext; vocabulary background; explicit means of text cohesion; jumbled text; abbreviation.

Ctankevich N.A., Shakirova E.A. A reflection of modern science while studying physics at the Academy // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 177–182.

One of the main direction of the method to teach physics is considered – information of actual problems of modern physics is given. Some new conceptions of modern physics are discussed. It strives for perfection the fundamental knowledge and very helpful for military education.

Key words: education, elementary partial, theory of strings, standard model, Higgs, gravitation, black hole.

Fattahov R.F., Fedirko A.A. Problem aspects of psychodiagnostic tools application in educational work // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 183–189.

The article presents the analysis of psychodiagnostic tools model structure, the nature and characteristics of its elements and the stages of development and use in educational work of management agencies. The classification of psychodiagnostic tools is also given during the personnel study. The author suggests the possible ways of contradictions resolving in this subject area through the comprehensive psychodiagnostic tools application.

Key words: educational work, psychodiagnostic tool, the model of psychodiagnostic tool, personnel research methods.

Nekrasov I.N., Sitkov R.A. The technique of estimation of quality experts we engage in the composition reconnaissance commissions // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 655. – P. 190–197.

This paper analyzes the current approach to the formation of expert commissions directed to conduct the reconnaissance surveys. Based on the identified weaknesses of the proposed methods of quality evaluation experts involved in the work of the survey committees. Practical recommendations on the use of this technique.

Key words: expert, targeting commission, specialist, verbal-numerical scale of Harrington, the expert properties.

Абазина Евгения Сергеевна, преподаватель 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: e.s.abazina@yandex.ru

Аверкиев Николай Фёдорович, профессор 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 347-96-16.

Алёхин Сергей Григорьевич, начальник отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-95-19, e-mail: vka-onr@mil.ru

Басотин Евгений Викторович, начальник факультета конструкции летательных аппаратов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-10, e-mail: Basotin@yandex.ru

Беседин Сергей Михайлович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 150-15-25.

Быкова Анна Николаевна, доцент 113-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук; тел.: 8 (812) 663-97-21.

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.: 347-96-16.

Волков Валерий Фёдорович, профессор 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (951) 652-32-63, e-mail: the_lexys@bk.ru

Волков Руслан Вячеславович, доцент 43-й кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 247-98-35.

Глебов Алексей Викторович, заместитель начальника 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-01.

Голованских Игорь Геннадьевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-42.

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 (812) 347-95-22.

Гравченко Юрий Анатольевич, заместитель начальника 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Жда-

новская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 347-95-14, e-mail: juraGR2025@yandex.ru

Гранкин Борис Константинович, профессор 14-й кафедры ВКА имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: borisgrankin@yandex.ru

Григорьев Кирилл Леонидович, заместитель начальника 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: Gk1239@mail.ru

Гудаев Роман Александрович, адъюнкт 83-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 895-47-03.

Елисейкин Сергей Анатольевич, главный специалист ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» (107996, Россия, Москва, ул. Щепкина, 42); кандидат технических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (495) 741- 66-26.

Ерунов Анатолий Александрович, адъюнкт 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: erun_to@mail.ru

Жаткин Александр Тимофеевич, преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Жигулин Юрий Алексеевич, адъюнкт 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 652-32-63, e-mail: the_lexys@bk.ru

Житников Тимофей Андреевич, адъюнкт 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: 0606848@rambler.ru

Забузов Вячеслав Сергеевич, старший преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-24.

Звонарев Виталий Валерьевич, начальник лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 325-14-15.

Зоткин Максим Юрьевич, адъюнкт 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: max053@yandex.ru

Казанцев Денис Иванович, начальник проектно-конструкторского бюро отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров Военно-космической

академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-05, e-mail: zilan.ka@yandex.ru

Киселёв Вячеслав Владимирович, начальник 131-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 347-96-16.

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: prof.kozlov @yandex.ru

Колесников Константин Григорьевич, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(911) 231-54-32, e-mail: kongrikol@rambler.ru

Королев Вадим Олегович, доцент 83-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 214-64-30.

Королев Степан Юрьевич, адъюнкт 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: st.korolev@list.ru

Кукушкин Игорь Олегович, начальник 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: kio142@mail.ru

Кукушкин Михаил Александрович, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 723-96-19.

Кулаков Александр Юрьевич, инженер КБ «Арсенал имени М.В. Фрунзе» (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3); тел.: 8 (981) 134-40-25, e-mail: U_Kulakov@mail.ru

Кулешов Юрий Владимирович, заместитель начальника Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского по учебной и научной работе (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 327-95-19, e-mail: vka-onr@mil.ru

Кульвиц Алексей Владимирович, старший преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Малышев Сергей Романович, доцент 43-й кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 247-98-35.

Масалкин Александр Алексеевич, адъюнкт 94-й кафедры 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

Матвеев Сергей Александрович, начальник штаба Главного испытательного космического центра имени Г.С. Титова (143090, Россия, г. Краснознаменск Московской области); тел.: 8 (495) 590-91-46.

Миронов Вячеслав Иванович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: mironuv@yandex.ru

Михеев Олег Юрьевич, заместитель начальника 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-01.

Москвин Борис Владимирович, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(953) 352-92-63, e-mail: z-moskvin@mail.ru

Некрасов Игорь Николаевич, начальник 152-й лаборатории (научно-исследовательской) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-10.

Осипенко Сергей Александрович, старший преподаватель 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 761-28-52, e-mail: Osipenko94@mail.ru

Павлов Александр Николаевич, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 259-71-53, e-mail: pavlov62@list.ru

Павлов Артемий Рафаилович, начальник 351-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8-911-092-08-83, e-mail: par.21@mail.ru

Петухов Анатолий Михайлович, слушатель офицерских курсов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-42.

Подрезов Владимир Александрович, главный специалист ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» (107996, Россия, Москва, ул. Щепкина, 42); доктор технических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (495) 741- 66-26.

Поливанов Владимир Александрович, заместитель начальника управления войсковой части 54023 (119160, Россия, Москва); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 190-50-29.

Полуаршинов Андрей Михайлович, начальник отдела районов падения ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» (107996, Россия, Москва,

ул. Щепкина, 42), кандидат технических наук; тел.: 8(495)741-66-26, e-mail: arshin@russian.space

Пономарев Дмитрий Юрьевич, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 974-65-44.

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 232-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 325-14-15.

Пряхин Владимир Александрович, старший научный сотрудник 233-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 325-14-15.

Рогов Дмитрий Александрович, начальник 83-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 084-61-79.

Салов Вячеслав Викторович, заместитель начальника 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 347-96-16.

Севидов Владимир Витальевич, адъюнкт 43-й кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (911) 001-85-67, e-mail: v-v-sevidov@mail.ru

Симонов Алексей Николаевич, доцент 43-й кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 247-98-35.

Ситков Роман Александрович, начальник 15-го отдела (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-10.

Слинько Алексей Алексеевич, адъюнкт 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 752-05-71, e-mail: Thebestman_leshka@mail.ru

Станкевич Наталия Александровна, старший помощник начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-69, e-mail: nat24ru@nm.ru

Сулаберидзе Давид Вячеславович, начальник лаборатории (научно-исследовательской) – заместитель начальника отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: david.s.v@icloud.com

Тарасевич Константин Олегович, старший помощник начальника отдела войсковой части 54023 (119160, Россия, Москва); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 728-94-79.

Толмачев Алексей Александрович, начальник учебного командного пункта 105-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 707-39-17, e-mail: the_lexys@bk.ru

Топорков Николай Святославович, начальник 353-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8-981-885-07-17, e-mail: k.toporkov@mail.ru

Туркин Алексей Алексеевич, начальник отделения ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов» (127490, Россия, Москва, ул. Декабристов, 51); тел.: 8 (499) 204-79-66, e-mail: info@niitr.ru

Фаттахов Руслан Фаритович, заместитель начальника 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-96-29 e-mail: fattarus@yandex.ru

Федирко Александр Александрович, доцент 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-97-29. e-mail: fedir300@mail.ru

Фоминов Иван Вячеславович, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: i.v.fominov@gmail.com

Шаймарданов Альберт Миргасимович, преподаватель 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 325-14-15.

Шакирова Эльза Акмеловна, доцент 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-72, e-mail: elza-shakirova@lenta.ru

Шалдаев Сергей Евгеньевич, начальник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 926-29-35.

Шевченко Артём Васильевич, начальник 171-й лаборатории (научно-исследовательской) – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (960) 249-68-64, e-mail: artnetru@yandex.ru

Шемелов Владимир Александрович, ведущий научный сотрудник отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-95-19, e-mail: vka-onr@mil.ru

Ширшов Николай Васильевич, начальник геофизического отдела ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» (107996, Россия, Москва, ул. Щепкина, 42); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 912- 86-12, e-mail: gfo@russian.space

Юрьев Анатолий Степанович, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 236-00-51, e-mail: artnetru@yandex.ru

Яснова Нина Семёновна, заведующая 113-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 347-95-09.

Аверкиев Николай Фёдорович, профессор 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8(812) 347-96-16, e-mail: averkiev@mail.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 217-03-39.

Башкирцев Виктор Павлович, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 8(911) 218-23-57, e-mail: orbitarus@mail.ru

Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-07.

Власов Сергей Александрович, доцент 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Волков Валерий Фёдорович, профессор 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-64.

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 (812) 347-95-22, e-mail: v_gorbulin@mail.ru

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 (812) 347-95-34.

Мануйлов Юрий Сергеевич, профессор 94-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: kotmanof@rambler.ru

Минаков Евгений Петрович, профессор 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 247-98-01, e-mail: ep.minakov12345@mail.ru

Миронов Александр Николаевич, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-13, e-mail: mironov-anik@yandex.ru

Москвин Борис Владимирович, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-62.

Онуфрей Андрей Юрьевич, ведущий научный сотрудник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского

го (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Пирогов Сергей Юрьевич, старший преподаватель 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-25, e-mail: pirogov205@mail.ru

Силантьев Сергей Борисович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 951-16-32.

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.

Щукин Георгий Георгиевич, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (921) 899-55-05, e-mail: ggshchukin@mail.ru