



## **Присяжнюк Сергей Прокофьевич**

*Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор,  
действительный член Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова,  
заведующий кафедрой геоинформационных систем Университета ИТМО,  
генеральный директор ЗАО «Институт телекоммуникаций»*

Сообщением ТАСС 4 октября 1957 года о выводе на орбиту Земли первого искусственного спутника началась новая космическая эра существования человечества.

Это был праздник торжества науки в СССР, достигнутый огромной технической культурой и согласованной работой сотен высоко квалифицированных людей.

Запуск первого искусственного спутника Земли стал огромным толчком развития науки в мире.

60 лет спустя достижения в Космосе стали обыденными событиями. Космос просто вошел практически во все сферы человеческой жизни. Развитие космической науки привело к образованию новых научных организаций, ведущих эффективную творческую деятельность.

ЗАО «Институт телекоммуникаций», организованное учеными из Военной Космической Академии им. А. Ф. Можайского, — творческий сплоченный коллектив, решивший за пятнадцатилетнее существование более 150 научно-исследовательских, опытно-конструкторских, проектных работ с организацией выпуска серийной наукоемкой современной продукции в области автоматизированных систем управления сложными системами инфокоммуникационных сетей, беспилотных летательных аппаратов, геоинформационных технологий, тренажерных комплексов и др.

## **Космическая эра человечества**

В институте функционирует орган по сертификации картографической продукции геоинформационных технологий и беспилотных летательных аппаратов в рамках «Военного Регистра». Ведется подготовка научных кадров высшей научной квалификации.

ЗАО «Институт телекоммуникаций» хранит и развивает традиции первооткрывателей Космоса, стараясь быть достойными их продолжателями.

# Содержание

*Селеня К.А.*

**Принципы построения модели эффективного ценообразования при государственном оборонном заказе** 7  
В статье рассмотрены основные принципы построения модели эффективного ценообразования при организации выполнения государственного оборонного заказа. Проведен анализ нормативно-правовых документов по обоснованию цен на продукцию. Представлена схема сотрудничества оборонно-промышленного комплекса с «оборонщиками» в условиях нынешней реформы гособоронзаказа. Рассмотрены различные подходы к ценообразованию продукции и виды цен при заключении государственного оборонного контрактов.

*Бондарев А.В., Груничева О.А., Андреева Е.О., Федоров Я.Ю.*

**Особенности проектирования и расчетного обеспечения разработки крупногабаритной трансформируемой космической штанги** 11  
Рассмотрены особенности проектирования, расчетного моделирования трансформируемой космической штанги отвода крупногабаритного рефлектора от космического аппарата, отражены сложности поставленных задач, предложены способы их решения.

*Лукьянов С.Г.*

**Модель для исследования условий применения двух космических аппаратов на гибкой невесомой связке** 18  
Предложена математическая модель движения легкого космического аппарата (ЛКА) малых размеров, отделяемого с борта тяжелого космического аппарата на гибкой невесомой связке. Рассмотрен алгоритм расчетов для имитационного моделирования движения, и приведены примеры траекторий относительного движения ЛКА на связке.

*Бондарев А.В., Блинов А.Ф., Артамонов С.В., Недашковская Е.С.*

**Перспективы развития конструкций космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса** 22  
Описаны конструктивные особенности космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса, их достигнутый технический уровень и ряд недостатков. Приведена конкретная разработка и реализация макета крупногабаритного рефлектора. Определены задачи дальнейших проработок по усовершенствованию конструкций этого типа, а также результаты проведенных исследований.

*Хабиров Д.О., Радченко А.А., Кочубей Д.Р.*

**Определение координат точек профиля контррефлектора двухзеркальных антенн на основе данных о профиле основного зеркала** 27  
Предложен и описан способ определения координат точек профиля контррефлектора двухзеркальных антенн на примере антенной системы П-2500. В качестве исходных данных используются координаты точек поверхности основного зеркала. С помощью данного способа может быть решена трехмерная задача, в отличие от существующего решения, полученного только для сечения поверхности основного зеркала вертикальной плоскостью.

*Бородулин Р.Ю., Щесняк С.С.*

**Применение гибридного ММ-КРВО метода для анализа излучения тонкопроволочных структур** 32  
В статье предлагается вариант совместного применения двух различных численных методов электродинамики – метода моментов (ММ) и метода конечных разностей во временной области (КРВО) для взаимного расширения их возможностей...

*Дубрович В.К., Заика Д.Ю., Качурин В.К., Цема Г.С., Щесняк С.С.*

**Моделирование процесса адаптации космического телескопа «Миллиметрон»** 39  
В статье рассмотрена методика адаптации космического телескопа «Миллиметрон», основанная на анализе изображения фокального пятна. Электродинамические расчеты параметров фокального пятна выполнены в приближении физической оптики для видимого диапазона длин волн ( $\lambda = 0,65$  мкм), что позволило увеличить точность установки элементов космического телескопа.

*Кузнецов А.С., Славянский О.Е., Хабиров Д.О., Бокучава П.Н., Гладуш А.И.*

**Способы повышения эффективности бортовых средств радиомониторинга наземных источников радиоизлучения за счет применения антенных решеток** 44  
Предложены два способа повышения эффективности космического фазового радиопеленгатора: за счет применения линейных антенных решеток в качестве антенных элементов пеленгатора, а также за счет использования кольцевых антенных решеток. Рассмотрен вопрос обработки сигналов с учетом вида сигнала.

*Бараник Ю.Н., Лукьянов С.Г.*

**Условия обнаружения сигнала в разностном канале при амплитудной пеленгации** 51  
В статье рассмотрены условия получения выигрыша в отношении сигнал/помеха в разностном канале по сравнению с суммарным при обнаружении полезного сигнала на фоне внешней помехи, действующей по основному лепестку диаграммы направленности.

*Щесняк А.С., Славянский А.О., Гриненко Ю.С.*

**Особенности проектирования универсальной высокоскоростной радиолинии передачи информации и взаимодействия космических аппаратов** 54  
В статье представлены особенности проектирования и основные характеристики универсальной высокоскоростной радиолинии (УВРЛ) передачи информации и информационного взаимодействия космических аппаратов баллистически-сопряженной группы низкоорбитальной космической системы нового поколения. Описываются требования, предъявляемые к УВРЛ, рассматриваются варианты построения радиолинии, приводится обоснование выбора конкретного решения и технические решения построения УВРЛ.

*Янжура А.С., Осадчий А.И., Бушманов С.М.*

**Сопряжение подводных автоматизированных систем со спутниковым каналом связи** 59  
Рассмотрена возможность создания морского буя-ретранслятора, позволяющего организовать информационный канал между спутниковыми системами связи и автономными подводными объектами. Особое внимание уделено разработке подводного акустического канала связи, исследованы и апробированы методы передачи данных в водной среде.

*Ометов А.Я.*

**Сравнительный анализ технологий связи дальнего радиуса действия, применимых для сетей мониторинга в условиях сложного рельефа местности** 64  
В статье рассмотрены доступные радиомодули дальнего радиуса действия, применяемые в сетях мониторинга городского типа. Представлены результаты сравнительного анализа устройств различных производителей по теоретически достижимым показателям производительности (максимальной пропускной способности, энергопотребления и времени жизни автономного устройства) при работе на аналогичных частотах. Рассмотрена проблема оптимизации вышеперечисленных показателей, исходя из радиуса зоны покрытия сети связи. Основным заключением является рекомендация по вводу в эксплуатацию системы, использующей протокол LoRa. Результаты, полученные в ходе данного исследования, целесообразно использовать при разработке проприетарного протокола передачи данных.

*Суринов А.С.*

Оценка точности навигационного обеспечения низкоорбитальных КА различного назначения на основе имитационного моделирования 70

В статье проведен системный анализ основных характеристик радиолиний, планируемых к реализации в перспективной аппаратуре низкоорбитальных КА, а также оценены показатели точности бортовой навигационной аппаратуры на основе имитационного моделирования.

*Алёшкин А.П., Макаров А.А., Алёшкин Н.А.*

Новые результаты в редуцированном оценивании и их применение для формирования групповой шкалы времени 77

В статье рассмотрены особенности известных скалярных и векторных оценок. Предложены процедуры с иным способом формирования коэффициента редукции. Предложен новый вариант редукции отдельно взятого  $i$ -го элемента  $m$ -мерного вектора параметров по принципу формирования скалярной редуцированной оценки Рао. Рассмотрены степенные варианты формирования коэффициента сжатия. Представлены результаты моделирования для различных условий применения предложенных алгоритмов.

*Алёшкин А.П., Макаров А.А., Иванов Д.В., Алёшкин Н.А.*

Применение мобильных длиннобазовых радиотелескопов для повышения устойчивости координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей 82

В статье рассмотрена методика, используемая при моделировании процесса определения координат мобильной станции по наблюдениям радиоинтерферометрических комплексов с длинной базой (РСДБ) путем решения обратной задачи по методу наименьших квадратов. Применение мобильных длиннобазовых радиотелескопов позволяет повысить устойчивость координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей.

*Павленко Т.С.*

Исследование радиационной стойкости малых космических аппаратов на солнечно-синхронной орбите 87

В статье проведен анализ влияния факторов космического пространства на работоспособность малых космических аппаратов, находящихся на солнечно-синхронной орбите. Рассмотрены вопросы защиты аппаратов от ионизирующего излучения...

*Ключев П.В., Янковский А.А., Алфёров И.Н.*

Метрологическое обеспечение испытаний космических аппаратов проекта «Луна-Глоб» 93

В статье рассмотрены мероприятия метрологического обеспечения испытаний макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб». Согласно Федеральной космической программы Российской Федерации на 2016–2025 годы, проект «Луна-Глоб» станет продолжением отечественных лунных миссий. Цель проекта – запуск автоматического зонда для исследований в районе Южного полюса Луны.

*Шмелев В.В., Аванесов М.Ю.*

Концепция интеллектуального мониторинга технических систем с компенсацией негативных факторов процесса передачи и приема информации 101

Рассматривается концептуальная основа решения задачи учета и компенсации возмущающих факторов процесса передачи и приема информации при мониторинге технических систем...

*Мионов В.А., Неровный В.В., Коротаев П.Д., Тимошенко А.В.*

Синтез устройств фильтрации помех в тракте навигационного приемника спутниковых радионавигационных систем 107

Проведен синтез канала компенсации помех при поиске навигационных сигналов в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем. Разработана математическая модель обнаружителя навигационного сигнала с каналом компенсации сигналоподобных помех, произведена оценка эффективности его функционирования при поиске навигационных сигналов.

*Греков О.А.*

Организация и проведение авиаучета охотничьих животных с использованием беспилотных авиационных систем самолетного и вертолетного типов 111

Для получения данных о видовом и численном составе охотничьих животных широко применяются беспилотные летательные аппараты (БЛА). В статье рассматриваются вопросы, связанные с организацией и проведением авиаучета охотничьих животных с использованием БЛА. Описываются характеристики БЛА и оборудования для аэросъемки. Раскрывается порядок работы по этапам проведения авиаучета и проблемы, возникающие при дешифрировании снимков. Приведен математический аппарат для получения итоговых данных.

*Саенко И.Б., Кий А.В., Ясинский С.А., Лыжинкин К.В.*

Управление доступом к ресурсам ведомственных информационных систем на основе информационных профилей пользователей 119

В статье рассматривается проблема обеспечения безопасности информации в ведомственных информационных системах. Обосновывается необходимость применения в составе системы защиты информации механизмов, обеспечивающих контроль выполнения пользователями процедур обработки информации, определенных требованиями политики безопасности и основанных на применении профилей пользователей. Предложена методика построения профилей пользователей на основе цепей Маркова и методов кластерного анализа.

*Грязев А.Н., Жигадло В.Э., Ясинский С.А., Зюзин А.Н.*

Оценка надежности транспортной сети телекоммуникационной системы при использовании систем резервирования 126

В статье производится оценка коэффициента готовности фрагмента сети при использовании различных систем резервирования транспортной сети телекоммуникационной системы в зависимости от изменения коэффициента готовности на каждой линии связи резервируемого сегмента сети и в зависимости от количества линий связи входящих в резервируемый сегмент сети.

*Исаков Е.Е., Мякотин А.В., Кривцов С.П., Жадан А.П., Басулин Д.В.*

Оценка необходимых и достаточных значений реальной пропускной способности военных систем передачи информации 133

В работе приведены примеры нерационального использования значений пропускных способностей каналов тональной частоты в аналоговых системах передачи, что влечет негативные последствия значений показателей устойчивости аналоговой системы передачи...

*Скороходов Я.А., Малышев Д.В.*

Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования 137

В статье представлены результаты анализа энергетической доступности системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов. Отличительной особенностью предложенного...

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Международная научно-техническая и научно-методическая конференция

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Радиотехнологии связи
- Инфокоммуникационные сети и системы
- Теоретические основы радиоэлектроники и систем связи
- Цифровая экономика и управление в связи
- Гуманитарные проблемы информационного пространства
- Сети связи специального назначения



28 ФЕВРАЛЯ •  
• 1 МАРТА

7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFOTELECOMMUNICATIONS

# Акционерное общество «Научный центр прикладной электродинамики»



## Опорно-поворотное устройство



ОПУ для стационарной антенной установки с зеркалом

### Технические характеристики:

- Диаметр рефлектора – 1,8 м.
- Тип привода – электромеханический
- Схема монтировки – двухосная.
- Диапазон углового перемещения:
  - от 0 до 88° по углу места;
  - ± 270° по азимуту.

### Режимы работы:

- режим переброски;
- режим выхода в заданную точку целеуказания с требуемой точностью;
- режим программного наведения (сопровождения);
- режим выхода в исходное положение.

Скорость перенацеливания – не менее 3°/с.

Скорости и ускорения в процессе программного наведения:

- 0,5°/с и 0,01°/с<sup>2</sup> – по азимуту;
- 0,1°/с и 0,02°/с<sup>2</sup> – по углу места.

Предельная погрешность наведения в диапазоне рабочих углов места и азимута – не превышает 4 угл. мин. Рабочий диапазон температур при эксплуатации – от минус 40 до 55°С.

Средняя скорость ветра при эксплуатации – до 20 м/с.



## Бортовой радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) L-диапазона

РСА предназначен для формирования зондирующих сигналов в заданных диапазонах частот, приема, оцифровки и запоминания отраженных от подстилающей поверхности сигналов.

### Характеристики радиолокационной аппаратуры для испытаний макета РСА на борту летательного аппарата

- частотный диапазон – 1215–1290 МГц
- ширина спектра – 75 МГц
- вид сигнала – ЛЧМ импульсы
- предельное разрешение по дальности – 2 м
- длительность импульса – от 0,5 до 30 мкс
- частота повторения импульсов – 200–1000 Гц
- масса аппаратного блока (без антенны) – до 2 кг
- полоса обзора – до 2 км
- импульсная мощность передатчика – 20 Вт
- потребляемая мощность – 25 Вт
- углы обзора поверхности – 30°–70°
- режим синтезирования изображения – маршрутный
- ширина «пятна» по азимуту – 180 м
- длина синтезированной апертуры – 180 м, 90 м, 68 м
- время накопления радиолограммы – 7 с; 3,5 с; 2,6 с
- предельное разрешение по азимуту – 0,75 м; 1,5 м; 2 м
- минимальная частота повторения импульсов, обеспечивающая однозначность изображения – 220 Гц



# Акционерное общество «Научный центр прикладной электродинамики»



## Многофункциональный мобильный комплекс авиамониторинга



### Решаемые задачи:

- Беспилотный дистанционный мониторинг, измерение и аэрофотосъемка местности, поиск и обнаружение объектов в заданном районе.
- Мониторинг и передача данных по радиоактивному и химическому заражению местности и воздушного пространства в заданном районе.
- Инженерная разведка районов наводнений, землетрясений и других стихийных бедствий.
- Обнаружение и мониторинг ледовых заторов и разлива рек.
- Мониторинг состояния транспортных магистралей, нефтегазопроводов, линий электропередач и других объектов.
- Экологический мониторинг водных экваторий и береговых линий.
- Определение точных координат районов ЧС и пострадавших объектов.



## Многофункциональный наземный пункт управления

Предназначен для управления комплексом и его элементами, включая БПЛА и целевой нагрузки, а также приема-передачи, обработки и отображения телеметрической, навигационной и видео информации.

## Мишенное полигонное оборудование



Радиоуправляемая мишенная установка для легкой и средней цели



Роботизированная дистанционно управляемая мишень-макет — имитатор противника



Транспортно-гусеничные шасси

## Геодезическое оборудование



Контроль и юстировка формы отражающей поверхности сетчатого рефлектора



Измерения поверхности рефлектора П-2500



Контроль геометрических характеристик зеркала РТФ-32



Контроль формы отражающей поверхности наземной антенной системы

## Принципы построения модели эффективного ценообразования при государственном оборонном заказе

### On principles of effective price determination model for national defense contracting

**Селеня / Selenya K.**

Кирилл Анатольевич

(kirill.selenya@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
заместитель генерального директора по экономической  
деятельности.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** государственный оборонный заказ – national defense contract; оборонно-промышленный комплекс – defense industry of Russia; принципы ценообразования – price determination principles; цена – price; продукция – product; контракт – contract.

В статье рассмотрены основные принципы построения модели эффективного ценообразования при организации выполнения государственного оборонного заказа. Проведен анализ нормативно-правовых документов по обоснованию цен на продукцию. Представлена схема сотрудничества оборонно-промышленного комплекса с «оборонщиками» в условиях нынешней реформы гособоронзаказа. Рассмотрены различные подходы к ценообразованию продукции и виды цен при заключении государственного оборонного контрактов.

This manuscript provides an overview of the main effective pricing models development principles of the military government procurement execution process. The study provides the detailed analysis of the legal documents for the pricing justification. The main outcome of the work is the co-operation model for the Defense industry of Russia and corresponding executive companies. The model is targeted to operate under current military procurement reform conditions. The main price determination methods and related pricing classification are given from the national defense contracting perspective.

В последнее время основным фактором напряженности для отечественной «оборонки» стали до предела обострившиеся разногласия с Министерством обороны по ценовым параметрам ГОЗ и поставок продукции.

Основанием для формирования нормативно-правовых документов (НПД) по обоснованию цен на продукцию, закупки которой связаны с поддержанием необходимого уровня обороноспособности и безопасности Российской Федерации, является Федеральный закон №60 «О поставках продукции для федеральных государственных нужд». Действующая система государствен-

ного оборонного заказа и ценообразования на военную продукцию сложилась в 1997 году, когда вступило в силу постановление правительства России №660 от 3 июня 1997 года «О ценах на продукцию оборонного назначения, поставляемую по государственному оборонному заказу» [1]. Во исполнение этого постановления была разработана и утверждена «Инструкция по формированию контрактных (договорных) цен на продукцию оборонного назначения, поставляемую по государственному оборонному заказу» №179 от 18 декабря 1997 г. В настоящее время данная инструкция является основным руководящим документом, регламентирующим организационные основы ценообразования на продукцию оборонного назначения, поставляемую по ГОЗ и позволяющим при построении модели эффективного ценообразования при государственном оборонном заказе обеспечить принцип обоснованности, который подразумевает соответствие НПД обоснованности цен на продукцию.

При поставках одной и той же продукции различным потребителям или государственным заказчикам организациями-исполнителями допускается формирование и согласование разных уровней цен.

Основным требованием при формировании цен является обеспечение выгодности производства продукции при эффективном использовании средств федерального бюджета [2, 3]. Выгодность производства продукции означает, что любое предприятие при выполнении ГОЗ должно быть в состоянии не только покрыть все свои издержки, но и получить достаточное вознаграждение, адекватное его усилиям.

Инструкцией предусматриваются следующие виды цен:

- фиксированные;
- возмещающие издержки;
- стимулирующие;
- ориентирующие.

Процедуру выбора вида цены государственному заказчику и организации-исполнителю ГОЗ предлагается осуществлять с использованием «Методических рекомендаций по применению видов контрактных

(договорных) оптовых цен на продукцию оборонного назначения».

Оптимальность решения обеспечивается учетом при выборе цены предпочтительной для нее группы (типа) продукции, условий применения цен, степени взаимной ответственности сторон, вариантов учета и распределения финансового риска и представления возможности нахождения компромиссного решения.

Фиксированные цены рекомендуется применять при:

- заключении контрактов, когда организация-исполнитель и государственный заказчик располагают исходными данными, необходимыми и достаточными для согласования экономически обоснованной цены;

- заключении контрактов на научно-техническую продукцию, по которой государственным заказчиком четко заданы технические задачи и другие требования, а организацией-исполнителем найдены их решения и действие научно-технических неопределенностей контракта может быть своевременно учтено;

- установлении цен на продукцию с небольшим технологическим циклом производства (до трех месяцев), а также на продукцию с более длительным циклом производства в год ее сдачи.

Цены, возмещающие издержки, рекомендуется применять при:

- серийном производстве сложной, с длительным циклом изготовления продукции (от трех и более месяцев), в том числе и ее опытных образцов;

- разработке сложной научно-технической продукции, проведении поисковых НИР, разработке дорогостоящих проектов [4].

Практически для всех направлений производства, групп и типов продукции могут применяться стимулирующие цены.

Обоснование размера цены поручается организации-исполнителю ГОЗ, поскольку исходной базой цены остается себестоимость [5]. Величина затрат может определяться методами:

- прямого счета по статьям калькуляции исходя из экономических и технических норм и нормативов и действующих (или, в отдельных случаях, прогнозируемых) цен;

- индексации сложившихся затрат по согласованным статьям калькуляции;

- введения расчётного предельного коэффициента изменения затрат;

- использования экономико-математических моделей (зависимостей) изменения затрат.

То есть при построении модели эффективного ценообразования при государственном оборонном заказе необходимо обеспечить не только принцип обоснованности, но и согласованности. Под принципом согласованности понимается формирование цен на продукцию с учетом выгоды при использовании денег федерального бюджета.

В основе оставшихся двух видов цен в стоимость оборонной продукции также закладывались допол-

нительные затраты предприятий при изготовлении продукции [4]. При этом стимулирующие цены учитывали еще и траты на развитие производства.

Естественно, при таком выборе способов ценообразования, предприятия старались либо искусственно завысить сроки производства военной продукции, чтобы добиться ориентировочных и пересматриваемых цен, либо в случае стимулирующих цен включить в контракт расходы, не связанные непосредственно ни с выпуском продукции военного назначения, ни с модернизацией производства. Ни один из рассматриваемых методов не обладает сегодня хорошей нормативной базой и механизмами их реализации, а там, где подобные инструменты имеются, – они давно устарели.

Начало нынешней реформе ГОЗ было положено в ноябре 2012 года, когда премьер-министр России Д. А. Медведев подписал распоряжение № 1216, вносящее ряд поправок в «Положение о Военно-промышленной комиссии». Этот орган, одной из основных задач которого является курирование ОПК России, возглавляет вице-премьер Д. О. Рогозин. Распоряжение Д. А. Медведева предписывает комиссии активно вмешиваться в ценовые споры между военными и предприятиями ОПК, в том числе участвовать в ценообразовании на военную продукцию. Фактически Военно-промышленную комиссию официально наделили полномочиями арбитра между военными и «оборонщиками».

Чтобы хоть как-то справиться со сложившейся ситуацией, Министерство обороны России предложило ОПК привлекательную, по мнению военного ведомства, схему сотрудничества с «оборонщиками». Так, военные обязались авансировать заказанные работы на 100% и подписывать контракты на поставку военной продукции в короткие сроки. От промышленности же требовалось неукоснительно реализовывать схему «20 плюс 1». По такой схеме головной подрядчик получал право делать наценку на готовую продукцию не более 20% от ее стоимости, а на продукцию субподрядчиков – не более процента. Также камнем преткновения военных и «оборонщиков» было финансирование государственных контрактов. Предприятия получали минимальные авансовые платежи на изготовление продукции или обходились без них, что заставляло их брать кредиты в банках под государственные гарантии, а после исполнения контракта и получения от Министерства обороны полной оплаты за проделанную работу, а погашать займы с процентами. Именно на борьбу с этим положением вещей и было направлено стопроцентное авансирование работ.

Пересмотреть принципы ценообразования на военную продукцию в марте 2013 года предложил вице-премьер России Д. О. Рогозин. По его поручению Федеральной службой по тарифам (ФСТ) России подготовлен новый проект постановления правительства о ценообразовании на военную продукцию, поставляемую в рамках ГОЗ.

Согласно новому проекту постановления правительства «Об условиях и порядке применения видов цен на продукцию по гособоронзаказу» закупка у единственного поставщика продукции, сроки производства которой не превышают три года, будет производиться по фиксированной стоимости, прописанной в контракте на поставку вооружений и военной техники.

Новый порядок, предложенный федеральной службой, предусматривает возмещение издержек предприятий ОПК только в случае проведения НИР и ОКР, а также закупки новых типов вооружений. Ориентировочные цены предлагается теперь указывать в контрактах только в том случае, если военные намерены закупить продукцию со сроком изготовления более трех лет. Эти цены предполагается указывать при заказе ремонта военной техники или схожих работ, стоимость которых до их полного завершения заранее просчитать невозможно. В случае покупки продукции с длительным циклом производства ориентировочные или уточняемые цены будут переводиться в разряд фиксированных после того, как объем исполнения государственного контракта достигнет отметки 80%. С этого момента пересогласовывать стоимость работ будет нельзя. Положение об ориентировочных ценах, как рассчитывают в ФСТ, позволит избавиться от приписок. Наконец, проект нового постановления правительства должен будет отменить стимулирующие цены на военную продукцию. По оценке Министерства обороны России, благодаря новому порядку ценообразования расходы бюджета на ГОЗ могут сокращаться на 10–15% ежегодно.

Анализ имеющихся и разрабатываемых документов показывает, что современная система ценообразования на оборонную продукцию базируется в основном на применении калькуляционного метода – затратного по своей сути, так как в его основе лежит суммирование совокупных издержек и прибыли. Сложилась система, при которой ни заказчики, ни исполнители не заинтересованы в снижении себестоимости. Первые – из-за отсутствия стимулов, вторые – и вследствие, и из-за возможности получения дополнительных доходов.

Главное «преимущество» калькуляционного метода – его удобство для проверяющих и контролирующих органов. Предоставление большого объема справок, «объясняющих» объем расходов по каждой подсистеме образца и составляющим ее многочисленным узлам и элементам, принимается заказывающими органами как «обоснование» требуемого финансирования для создания ПВН. При этом не достигается главная цель ценообразования – постоянное повышение эффективности использования финансовых ресурсов.

Преобладание затратных методов ценообразования, нарушающих принцип рационального экономического поведения, обуславливает неэффективное использование бюджетных средств не только в военном секторе, но и в экономике страны в целом. Использование контрактов типа «фиксированная цена», хоть и облегчает проце-

дуру контроля за структурой отпускных цен для государственного заказчика, но не способствует разработке инновационной продукции, поскольку приводит к тому, что в стремлении снизить цену конструкторские бюро вынуждены не разрабатывать новые, а дорабатывать старые образцы вооружений. Таким образом, твердые цены подавляют инновации.

Второй распространенный подход, состоящий в ограничении уровня рентабельности на приобретаемые изделия, хоть и служит вполне разумным средством противодействия несправедливому обогащению первичных подрядчиков при выполнении ГОЗ (вследствие использования «мультипликативного эффекта» повышения затрат по всему циклу кооперации оборонных подрядчиков), но, в то же время, выступает в качестве ключевого фактора, снижающего уровень инновационной активности предприятий ОПК. Если заказчик создает для первичного подрядчика невыгодные условия субконтракта, то последний будет стремиться оставить как можно большую долю работы себе, чтобы не уменьшить собственную прибыль.

Все это требует при построении модели эффективного ценообразования при государственном оборонном заказе обеспечения принципа оптимальности. Принцип оптимальности – это процесс нахождения компромисса при выборе и обосновании вида цен на ПВН при взаимной ответственности сторон.

Производители готовой продукции – системные интеграторы – несут ответственность за изделие в целом, включая гарантийные обязательства. Производитель готовых изделий осуществляет сложное управление цепью поставок, в рамках которого несет большие риски за несвоевременные поставки, за некомплектные поставки, за поставки некачественных комплектующих, поэтому ни в коем случае нельзя сравнивать головного исполнителя с оптовой базой. Формула «20%+1%», как и любое иное подобное ограничение, снижает мотивацию на развитие кооперации и заставляет предприятия возвращаться на путь «полного цикла», инсорсинга.

Кроме того, в отсутствие в российской практике норматива учета фактора риска первичного подрядчика, данную функцию фактически выполняет коэффициент рентабельности на привнесенные затраты, субконтрактные работы. Зарабатываемая таким образом прибыль служит дополнительным вознаграждением за эффективный менеджмент субпоставок и грамотную логистику головного исполнителя.

Необходимо отметить, что в настоящее время при формировании ГОЗ до сих пор действуют принципы, унаследованные от СССР. При этом ФЗ «О государственном оборонном заказе» содержит нормы, предусматривающие регулирование цен у головных исполнителей и у исполнителей первого уровня, т.е. сейчас эта система, по сути, распространяется только на производителей конечной продукции. При этом надо учесть, что исполнители второго и третьего уровней часто являются единственными поставщиками в силу специ-

фики оборонной продукции. То есть фактически они монополисты и диктуют головному исполнителю свои цены. Отсутствие государственной политики регулирования цен по всей цепочке кооперации субподрядчиков, выполняющих ГОЗ, является мощным тормозом инновационной активности предприятий ОПК. Субподрядчики-монополисты не заинтересованы в инновациях, т.к. сознают свою незаменимость и могут диктовать условия поставок своей зачастую устаревшей продукции. Инновации возможны при выполнении принципа мотивации. Данный принцип предполагает развитие инновационной активности заказчика, головного исполнителя и соисполнителей при разработке и производстве ПВН.

Немаловажным является то, когда цена ПВН на каждом этапе ОКР формируется исходя из стоимости всей выполняемой работы и ее сопровождения после сдачи заказчику. Принцип полноты – это когда цена каждой стадии жизненного цикла образца определяется исходя из полной стоимости всего жизненного цикла.

Еще одной важной деталью современной российской системы военной контрактации, дестимулирующей инновации, является применение коэффициентов, которые отражают инфляционные процессы – индексы цен и индексы-дефляторы, устанавливаемые Министерством экономического развития и применяемые при прогнозировании цен на продукцию военного назначения.

## Заключение

Таким образом, существующая система ценообразования не стимулирует внедрение на предприятиях ОПК организационных, технологических, научных и других новаций, способствующих снижению себестоимости продукции и повышению ее качества. Необходима разработка новой системы. В ее основу следует положить соотнесение цены продукции и ее качества (полезности) – определение справедливой цены.

Суть подхода заключается в единстве двух аспектов. Первый отражает интересы заказчика (государства) в части эффективного с военно-экономической точки зрения использования бюджетных средств. Второй – интересы исполнителя и заключается в экономической привлекательности заказа.

Таким образом, проведенный анализ позволяет выделить принципы ценообразования обоснованности, согласованности, оптимальности, мотивации и полноты.

## Литература

1. О ценах на продукцию оборонного назначения, поставляемую по государственному оборонному заказу: постановление правительства России от 3 июня 1997 г. № 660 // Собрание законодательства. – 1997. – № 179.

2. Свиных, Е. А. Новое в правовом регулировании ценообразования в сфере государственного оборонного заказа /

Е.А. Свиных // Право в Вооруженных Силах. – 2014. – № 2. – С. 92–97.

3. Молчанов, Ю. Ю. Государственный оборонный заказ: обоснование цены контрактов / Ю.Ю. Молчанов // Законность. – 2014. – № 6. – С. 36–39.

4. Русаков, А. Ю. Ценовая политика в сфере государственного оборонного заказа / Ю.А. Русаков // Российское предпринимательство. – 2012. – Т. 13, № 5. – С. 106–110.

5. Донская, В. Ю. Трансфертные цены: достоинства и недостатки способов расчета / В.Ю. Донская // Математические модели и информационные технологии в менеджменте. – 2007. – № 12, Вып. 1. – С. 148–157.

## Особенности проектирования и расчетного обеспечения разработки крупногабаритной трансформируемой космической штанги

### Design and calculative design specifics of the large-size deployable space mast

#### Бондарев / Bondarev A.

Андрей Вячеславович

(andrey.bondarev@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
начальник расчетно-исследовательского отдела.

г. Санкт-Петербург

#### Груничева / Grunicheva O.

Ольга Александровна

(olga.grunicheva@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер-конструктор 1-й категории

расчетно-исследовательского отдела.

г. Санкт-Петербург

#### Андреева / Andreeva E.

Евгения Олеговна

(evgeniaya.andreeva@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер-конструктор 1-й категории

конструкторского отдела.

г. Санкт-Петербург

#### Федоров / Fedorov Y.

Ян Юрьевич

(yan.fedorov@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
ведущий инженер-конструктор конструкторского  
отдела.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** трансформируемая штанга – transformable mast; рефлектор – reflector; особенности расчета – calculative design specifics; конечно-элементное моделирование – finite element modeling.

Рассмотрены особенности проектирования, расчетного моделирования трансформируемой космической штанги отвода крупногабаритного рефлектора от космического аппарата, отражены сложности поставленных задач, предложены способы их решения.

Design and calculative design specifics of the deployable space mast moving large-size reflector from the spacecraft are considered, shown the complexity of tasks, proposed methods of their solution.

С развитием космической техники все чаще возникает потребность при развертывании систем в космосе обеспечить перемещение аппаратуры на значительное расстояние от космического аппарата (КА). В частности, при создании развертываемой в космосе антенной системы с рефлектором диаметром 48 м требуется обеспечить его отвод на 31 м от космического аппарата, на котором располагается облучатель.

Эта задача должна решаться с помощью штанги, имеющей в сложном состоянии габариты, позволяющие разместить ее на КА под обтекателем, а в развернутом – обеспечить необходимое отстояние от КА закрепленного на ее конце рефлектора (рис. 1).

Штанга состоит из трансформируемого каркаса, представляющего собой стержневую конструкцию, образующую в развернутом положении 32 секции, каждая в виде параллелепипеда с диагональными стержнями на боковых сторонах, привода развертывания трансформируемого каркаса, конечного и корневого механизмов, обеспечивающих необходимое угловое положение рефлектора относительно космического аппарата в процессе развертывания антенной системы, и корпуса, объединяющего остальные элементы штанги.

Продольные стержни каждой секции имеют возможность складываться (рис. 2). Внутри стержней вмонтирован пружинный механизм с упорами, который работает совместно с приводом развертывания и обеспечивает устойчивость стержней в развернутом положении. Механизм прошел успешную апробацию в составе опытного образца трансформируемого космического рефлектора и защищен патентом [1].

Диагональные стержни обеспечивают крутильную жесткость штанги в развернутом положении. Они имеют телескопическую конструкцию и фиксируются в развернутом положении подпружиненными защелками конической формы.

С целью выбора люфтов, образуемых зазорами в шарнирных узлах штанги, длина диагональных стержней в развернутом положении выбрана таким образом, чтобы в продольных стержнях каждой секции создавалось предварительное натяжение на их сжатие при развертывании штанги. Это даёт возможность обеспечить требования крутильной и изгибной жесткости штанги.

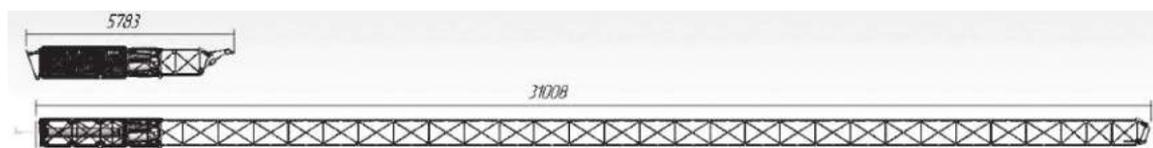


Рис. 1. Штанга в сложенном и развернутом положениях



Рис. 2. Продольный стержень секции в развернутом и сложенном положениях

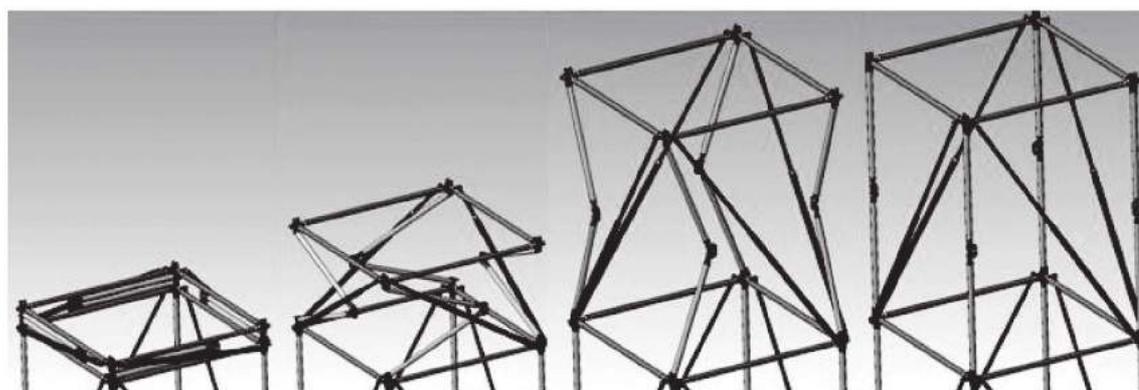


Рис. 3. Процесс развертывания секции штанги

Процесс трансформации стержней в процессе разворачивания штанги показан на рис. 3.

При исследовании процесса разворачивания штанги проведены натурные эксперименты с оценкой возможности разворачивания её секций, а также их взаимодействия с механизмом разворачивания, который имеет четыре кинематические цепи, каждая из которых замыкается на общий мотор-редуктор и имеет на выходе звездочку, подхватывающую в процессе разворачивания штанги каркас ячейки в зоне продольного стержня.

При проектировании штанги выполнен комплекс расчетов, охватывающий все стадии ее эксплуатации – от испытаний и транспортирования штанги в земных условиях до удержания в космосе рефлектора в требуемом положении относительно КА (рис. 4).

Задача повышения жесткости штанги и, соответственно, частот собственных колебаний системы «штанга-рефлектор» до требуемого уровня, являлась самой сложной. Предварительно потребовалась большая расчетная работа по поиску оптимальной структуры стержневой конструкции штанги, поэтому в ходе исследования было рассмотрено более 10 вариантов схем построения штанги (рис. 5).

Критериями оценки вариантов являлись масса штанги, изгибная и крутильная жесткости конструкции. Изгибная жесткость определяется по формуле:

$$EI = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot u}, \quad (1)$$

где  $F$  – приложенная сила, Н;  
 $l$  – длина штанги, м;  
 $u$  – линейные перемещения узла в точке приложения нагрузки, м.

Крутильная жесткость определяется по формуле:

$$GI_p = \frac{M_{кр} \cdot l}{\varphi}, \quad (2)$$

где  $M_{кр}$  – приложенный крутящий момент, Н · м;  
 $\varphi$  – угловые перемещения узла в точке приложения нагрузки, радианы.

Для дальнейшего проектирования выбрана ферменно-стержневая конструкция с 4 параллельными поясами (рис. 6).

Исходные основные требования к штанге:

- масса – не более 70 кг;
  - низшая частота собственных колебаний в рабочем положении – не менее 0,05 Гц с учетом массы рефлектора 430 кг и его моментов инерции;
  - конструкция предназначена для работы в условиях ГСО [2]: диапазон температур от  $-150^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ .
- В дальнейшем ряд основных требований к штанге неоднократно менялся:



Рис. 4. Схема расчетного обеспечения проектирования

– возросло требование к низшей частоте собственных колебаний штанги в рабочем положении на орбите в 3 раза (0,15 Гц);

– увеличились собственные моменты инерции рефлектора более чем в 6 раз.

Увеличение требуемой частоты собственных колебаний штанги с раскрытым рефлектором в 3 раза даже при сохранении прежних моментов инерции рефлектора требует увеличения крутильной и изгибной жесткости штанги в 9 раз.

Это следует из общеизвестных формул для частот собственных колебаний конструкции при кручении и изгибе.

Частота крутильных колебаний:

$$f_1^{кр} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{G \cdot J_p}{\ell \cdot I_p}} \quad (3)$$

где  $G \cdot J_p$  – крутильная жесткость поперечного сечения штанги, Н·м<sup>2</sup>;

$\ell$  – длина штанги, м;

$I_p$  – момент инерции рефлектора относительно оси штанги, кг·м<sup>2</sup>.

Частота изгибных колебаний:

$$f_1^{изг} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot J}{m_p \cdot \ell^3}} \quad (4)$$

где  $E \cdot J$  – изгибная жесткость поперечного сечения штанги, Н·м<sup>2</sup>;

$m_p$  – масса рефлектора, кг.

Повышение жесткости штанги и, соответственно, частот собственных колебаний системы "штанга-рефлектор" до определенного уровня (при неизменном габаритном размере штанги в поперечном сечении) приводит к пропорциональному увеличению диаметра основных элементов ферменного каркаса штанги: поясов, раскосов и стоек. Заметное увеличение частот собственных колебаний проявляется при увеличении диаметров поясов фермы до значений 40..50 мм и толщиной 1,0..2,0 мм.

Дальнейшее повышение жесткости штанги (в том числе в 9 раз) за счет увеличения диаметров и толщин элементов не приводит к существенному увеличению частот собственных колебаний системы "штанга-рефлектор", поскольку многократно увеличивается масса штанги (стержневых и особенно соединительных элементов), которая уже превышает массу рефлектора и снижает частоты как за счет массы штанги, так и за счет моментов инерции элементов конструкции штанги.

Кроме того, увеличение собственных моментов инерции рефлектора более чем в 6 раз требует дополнительно значительного увеличения крутильной и изгибной жесткости штанги (примерно в 1,5..2,5 раза). Это еще дополнительно увеличивает массу штанги.

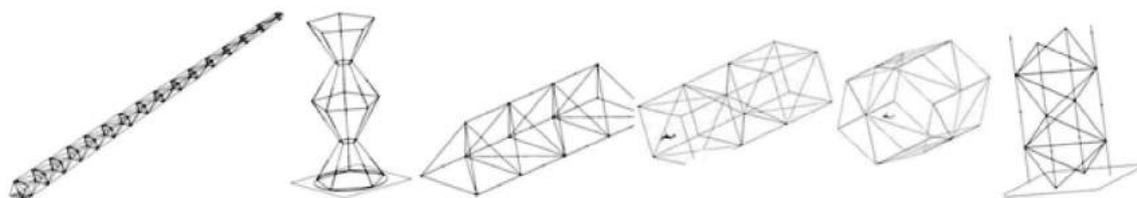


Рис. 5. Различные схемы построения трансформируемой штанги

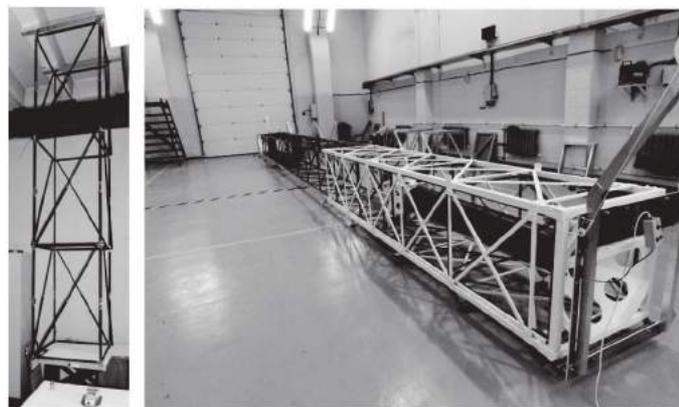


Рис. 6. Реализованная структура трансформируемой штанги

Увеличение диаметров и толщин элементов штанги неэффективно и не позволяет достичь требуемых системы "штанга-рефлектор" при указанных их габаритно-массовых характеристиках.

Кроме того, требуемое многократное увеличение диаметров поясов и раскосов штанги приводит к значительному увеличению суммарной длины соединительных элементов и, следовательно, к прямо пропорциональному увеличению температурных деформаций штанги в условиях эксплуатации, которые не укладываются в требование по линейному смещению.

Более эффективный способ достижения частот 0,15 Гц и выше – это увеличение габаритных размеров фермы в поперечном сечении. В первом приближении, можно считать, что частота прямо пропорциональна расстоянию между поясами фермы.

Для оптимизации элементов конструкции разработаны конечно-элементные модели (КЭМ) элементов штанги в ПК «ANSYS». Оптимизация велась по критериям «масса – жесткость – температурные деформации».

Предварительный анализ конструкции штанги показал, что ее жесткостные характеристики в значительной степени зависят от соединительных элементов (СЭ) и шарнирных узлов штанги. Это узлы соединения секций (корпуса), СЭ складывающихся стержней и телескопических раскосов, корневого и концевого механизмов; всего более 10 типоразмеров узлов с общим числом их около восьмисот.

Необходимость детального учета жесткости СЭ диктовала создание их КЭМ, максимально точно описывающих реальную конструкцию и позволяющих учесть, в том числе контактные податливости

в шарнирных соединениях. Первые попытки создания полномасштабной КЭМ штанги, включающей КЭМ СЭ, показали, что работа с такой моделью требует очень больших ресурсов вычислительной техники, затрудняет поиск оптимальных конструктивных решений.

Было принято решение: разработать КЭМ СЭ отдельно от стержневой конструкции, а затем полученные их характеристики ввести в КЭМ штанги. Созданы объемные КЭМ всех СЭ конструкции с учетом контактирующих пар поверхностей деталей (рис. 7).

Для включения в полномасштабную КЭМ штанги СЭ смоделированы с помощью стержневых конечных элементов с подобранными характеристиками сечений, соответствующими вычисленным на объемных КЭМ податливостям элементов: на растяжение (площадь сечения), изгиб в двух плоскостях (моменты инерции на изгиб) и кручение (момент инерции сечения при свободном кручении).

Особенностью моделирования механизмов поворота штанги стало наличие сферических подшипников в соединениях рычагов привода и устройства фиксации. Для моделирования этих элементов использовались условия совместности перемещений узлов (Coupled DOFs).

Предложенный подход к структурному анализу имеет очевидный недостаток: получена упрощенная матрица жесткости соединительных узлов сложной геометрической формы, поскольку трудновыполнимо абсолютно точное воспроизведение картины нагружения КЭМ отдельных элементов, которая имеет место в конструкции штанги. Однако этот подход позволил оперативно влиять на процесс проектирования в части повышения жесткости всех элементов конструкции штанги до требуемого уровня.

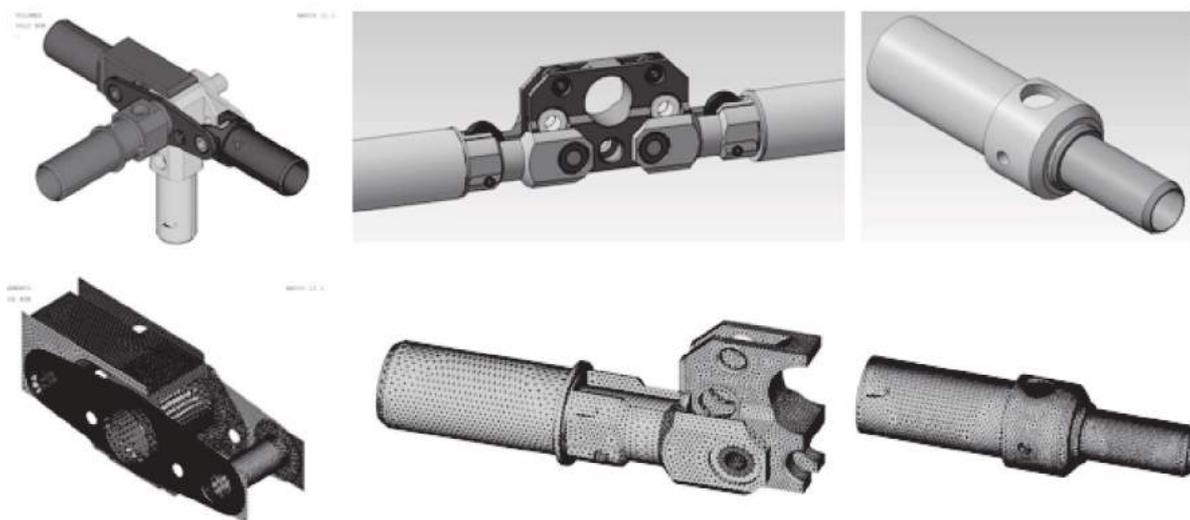


Рис. 7. КЭМ соединительных элементов и контактные пары

Комплексная программа экспериментальной отработки



Рис. 8. Схема комплекса испытаний

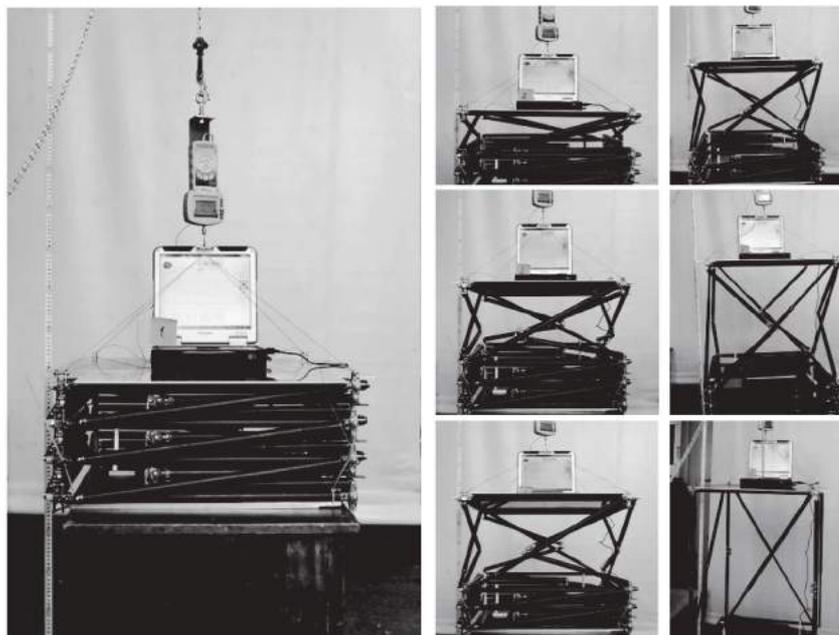


Рис. 9. Испытания макета складывающейся секции. Проверка усилий на разворачивание

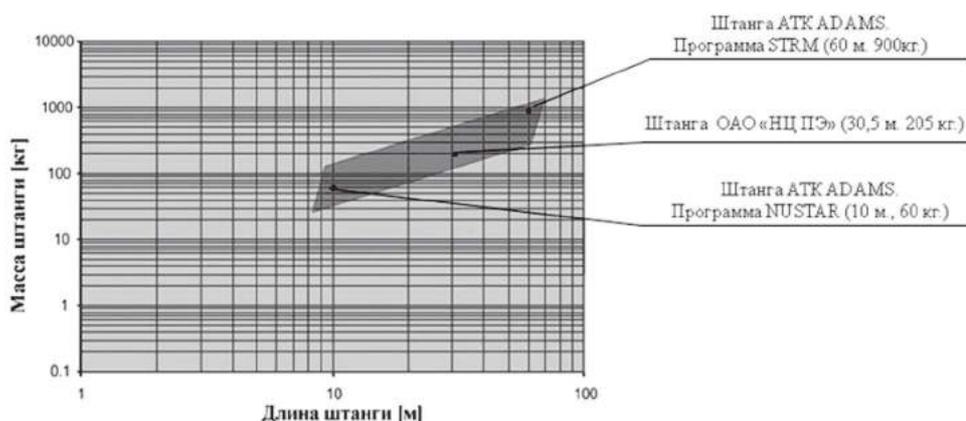


Рис. 10. Область нахождения зависимостей массы штанги от её длины для штанг данного типа

В целях подтверждения и уточнения расчетных данных проведен комплекс испытаний отдельных узлов и элементов штанги, а также опытного образца штанги, в том числе в составе рефлектора (рис. 8, 9).

Результаты испытаний в целом подтвердили характеристики, полученные расчетным путем. Критерии оценки эффективности принятых решений:

- 1) жесткость конструкции;
- 2) масса конструкции;
- 3) температурные деформации конструкции.

Проделанная работа показала перспективность выбранной схемы разворачиваемой космической штанги, а сравнение ее характеристик (рис. 10) с зарубежными образцами конструкций аналогичного назначения, в частности штанг ADAM фирмы Able Engineering [3], и ее конкурентоспособность.

## Заключение

1 Проведенные исследования позволили выявить ряд направлений совершенствования конструкции штанги:

- сокращение габаритов шарнирного узла с пружинным механизмом, что позволит сократить массу и температурные деформации штанги;
- отработка технологии сборки складывающихся стержней, обеспечивающей их строгую прямолинейность после разворачивания, что позволит исключить вероятность произвольного складывания штанги и появления «упругих» люфтов в ней при воздействии инерционных нагрузок на нее со стороны рефлектора;
- усовершенствовать конструкцию механизма разворачивания, обеспечив равную жесткость всем 4 его кинематическим цепям.

2. Требуемые характеристики штанги, обеспеченные расчетно-исследовательским путем, реализованы на опытном образце штанги и подтверждены многочисленными испытаниями на разворачивание (функци-

онирование), а также испытаниями на изгибную и крутильную жесткость.

## Литература

1. Пат. № 2474736 Российская федерация МПК8 F 16 C 11/04. Развертывающееся шарнирное соединение / А.Ф. Блинов [и др.]; патентообладатель ФГУП «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе»; № 2011132994/11; заявл. 27.07.2011; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4. – 13 с.
2. Кантор, Л. Я. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты / Л.Я. Кантор, В.В. Тимофеев. – М. Радио и связь, 1988. – 168 с.
3. Puig, L. A review on large deployable structures for astrophysics missions / L. Puig, A. Barton, N. Rando // Acta Astronautica. – Vol. 67, Iss. 1–2. – P. 12–26.

## Модель для исследования условий применения двух космических аппаратов на гибкой невесомой связке

### Research model of application conditions of two space vehicles on a flexible weightless sheaf

**Лукьянов / Lukyanov S.**

Сергей Геннадьевич

(s.lukjanov@scaegroup.com)

кандидат технических наук, доцент.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
начальник отдела.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** гибкая невесомая связка – flexible weightless sheaf; гравитационные силы – gravitational forces; сопротивление воздуха – aerodynamic resistance; упругая реакция троса – elastic reaction of a connecting cable; траектории относительного движения – trajectories of relative movement.

Предложена математическая модель движения легкого космического аппарата (ЛКА) малых размеров, отделяемого с борта тяжелого космического аппарата на гибкой невесомой связке. Рассмотрен алгоритм расчетов для имитационного моделирования движения, и приведены примеры траекторий относительного движения ЛКА на связке.

The mathematical model of movement of the easy small space vehicle separated from a board of a heavy space vehicle on a flexible weightless bunch is offered. The algorithm of calculations for imitating modelling of movement is considered and trajectories of relative movement of the easy space vehicle on a bunch are presented.

#### Введение

Для создания на низких орбитах долговременно существующей баллистически связанной группы объектов с тяжелым КА в центре и несколькими легкими КА малых размеров на заданных удалениях от него, необходимо использование удерживающих связей. При малых удалениях объектов друг от друга (до десятков метров) возможно применение жестких связей, которые позволяют зафиксировать конфигурацию «созвездия» из тяжелого и малых КА.

Для ряда прикладных применений связки нескольких объектов их взаимные удаления должны составлять единицы и десятки километров. Такое связанное движение «созвездия» можно реализовать с помощью гибких тросовых систем. В данной статье предлагается математическая модель движения ЛКА на гибкой невесомой связке с тяжелым КА, которая может быть

использована для анализа особенностей движения привязного ЛКА при различных условиях его отделения и характеристиках тросовой системы.

#### Условия использования и допущения математической модели

Движение привязного ЛКА, отделенного с борта центрального тяжелого КА, отличается от движения свободно отстреливаемого ЛКА тем, что граница его удаления от КА определяется длиной связывающего фала.

Особенностью является и то, что при движении объектов в связанном состоянии появляется сила натяжения троса. Влияние натяжения троса на вид траекторий объектов, а также неопределенность в положении привязного ЛКА относительно КА, обуславливают необходимость создания математической модели движения ЛКА на гибкой связке с тяжелым КА.

В данной статье такая модель разработана для пары «КА – ЛКА» при ряде условий и допущений. Объекты связки принимаются за точечные объекты с массами  $m_1$  и  $m_2$ , причем  $m_1 \gg m_2$ .

Уравнения движения ЛКА записываются в орбитальной относительной системе координат OXYZ [1]. Гравитационное поле Земли является центральным и определяется потенциалом  $U = \mu/r$ , где  $r$  – расстояние от центра Земли до объекта. Атмосфера стандартная, плотность воздуха  $\rho$  на высоте  $H$  определяется зависимостью [2]  $\rho = \rho_0 \exp(-(H - H_0)/c)$ .

Воздействие аэродинамических сил на объекты связки сводится только к силе лобового сопротивления  $0,5B\rho V^2$ , где баллистический коэффициент  $B = C_x S_M/m$ ;  $S_M$  – площадь миделева сечения,  $C_x$  – коэффициент, характеризующий аэродинамическую форму объекта, движущегося со скоростью  $V$  относительно воздуха.

Связь КА считается идеальной, то есть дающей при её действии только нормальную реакцию к поверхности связанного тела [3]. Трос принимается невесомым,

а его упругие свойства характеризуются коэффициентом восстановления  $\vartheta$ .

### Математическая модель движения ЛКА на гибкой невесомой связке

Базовый объект и ЛКА, связанные тросом, представляют собой несвободную систему двух материальных точек. Так как трос ограничивает область пространства относительно КА, в котором может пребывать ЛКА, то связь является неустойчивающей (освобождающейся) и аналитически она представляется в виде неравенства [1, 2, 3]

$$f = f(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, t) \geq 0 \quad (1)$$

где  $\dot{x}_i = dx_i / dt, \dots, \dot{z}_i = dz_i / dt; i=1, 2$ , причем  $i=1$  для КА и  $i=2$  для ЛКА.

Если имеет место строгое неравенство  $f > 0$ , то  $i$ -я точка связанной системы не находится на связи и движется как свободная материальная точка. Тогда её движение описывается вторым законом Ньютона

$$m\ddot{a} = \vec{F}, \quad (2)$$

где  $\vec{F}$  – суммарная сила, действующая на точку. В нашем случае она равна результирующей сил притяжения Земли и аэродинамического сопротивления.

Если функция  $f=0$ , то точка находится на связи. Тогда на точку воздействует дополнительная сила  $\vec{R}$  реакции связи. Согласно аксиоме связей, движение этой несвободной точки описывается законом [1, 2, 3]

$$m\ddot{a} = \vec{F} + \vec{R} \quad (3)$$

Реакция связи выражается зависимостью

$$\|R_i\| = \lambda^* \|f_i\| \quad (4)$$

где  $\|R\| = \|R_x \ R_y \ R_z\|^T$  – матрица-столбец проекций силы реакции связи на соответствующие оси координат;  $\|f_i\| = \|\partial f / \partial x_i \ \partial f / \partial y_i \ \partial f / \partial z_i\|^T, T$  – символ транспонирования.

Множитель Лагранжа  $\lambda^*$  в общем случае переменный, он характеризует реакцию связи. Условиями нахождения  $i$ -ой точки системы на связи, а следовательно и выхода на связь, являются условия

$$f_i = 0, \quad df_i / dt = 0, \quad \lambda_p > 0, \quad (5)$$

где  $\lambda_p$  – расчетное значение множителя  $\lambda^*$  в данный момент времени.

Объединяя (2)–(5), получим единую запись уравнений движения несвободной точки при действии неустойчивающей конечной связи

$$m_i \|\ddot{r}_i\| = \|F_i\| + \lambda^* \|f_i\|, \quad i=1, 2 \quad (6)$$

где  $\|\ddot{r}_i\| = \|\ddot{x}_i \ \ddot{y}_i \ \ddot{z}_i\|^T$  – матрица-столбец, элементами которой являются проекции вектора ускорения  $i$ -й точки связки на соответствующие оси;  $\|F_i\| = \|F_{xi} \ F_{yi} \ F_{zi}\|^T$ ;

$$\lambda^* = \begin{cases} \lambda_p & \text{при } f = 0 \text{ и } df / dt = 0, \\ & \text{и } \lambda_p > 0 \text{ (одновременное выполнение)} \\ 0 & \text{при } f \neq 0, \text{ или } df / dt \neq 0 \text{ при } f = 0, \\ & \text{или } \lambda_p \leq 0 \end{cases}$$

Сила реакции гибкой связи зависит не только от самой связи, но и от активных сил, действующих на связку, и параметров движения связки. Ограничение, накладываемое связью, для рассматриваемой системы:

$$f = l(t) - D(t) \geq 0, \quad (7)$$

где  $l(t)$  – текущая длина троса при его разворачивании или свертывании;

$D(t) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$  – текущее расстояние между объектами.

В рамках данной статьи не рассматриваются различные законы разворачивания связывающего троса  $l(t)$ , а считается, что при начальном отделении ЛКА трос свободно без трения и без инерции распускается на всю длину  $L$ .

В этом случае состояние натяжения троса определяется условиями

$$D = l, \quad \dot{D} = \dot{l}, \quad \lambda_p > 0, \quad \text{где } \dot{l} = dl / dt.$$

При принятом допущении  $m_1 \gg m_2$  центр орбитальной системы координат совпадает с положением базового объекта связки, который при этом движется по кеплеровской орбите (в предположении пренебрежения малыми внешними возмущающими воздействиями на КА). При рассмотрении относительного движения ЛКА в заданной системе координат уравнение (7) принимает вид

$$f = l - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \geq 0 \quad (8)$$

где  $x, y, z$  – относительные координаты ЛКА.

Проекции силы реакции, приложенной к ЛКА, на оси орбитальной системы координат выражаются следующими зависимостями

$$R_x = -\lambda_p x / D, \quad R_y = -\lambda_p y / D, \quad R_z = -\lambda_p z / D. \quad (9)$$

Выражение для  $\lambda_p$  в общем виде имеет вид [1, 2]

$$\lambda_p = -(\|f\|^T \|F\| + m \sum_2) / (\|f\|^T \|f\|),$$

где  $\sum_2$  – сумма членов со вторыми частными производными, равная

$$\sum_2 = \|\dot{r}\|^T \|\Phi\| \|\dot{r}\| + 2(\partial \|f\|^T / \partial t) \|\dot{r}\| + \partial^2 f / \partial t^2,$$

$$\|\Phi\| = \begin{vmatrix} \partial^2 f / \partial x^2 & \partial^2 f / \partial x \partial y & \partial^2 f / \partial x \partial z \\ \partial^2 f / \partial y \partial x & \partial^2 f / \partial y^2 & \partial^2 f / \partial y \partial z \\ \partial^2 f / \partial z \partial x & \partial^2 f / \partial z \partial y & \partial^2 f / \partial z^2 \end{vmatrix}.$$

Для модели движения (6) (с учетом ограничения (8)) выражение для расчетного значения множителя Лагранжа примет вид

$$\lambda_p = m_2 [4\omega x \dot{y} + B_{\alpha} \rho V_{\alpha} (V_{\kappa} - \dot{x})x - B_{\kappa} \rho V_{\kappa}^2 x + 6\omega^2 y^2 - 4\omega y \dot{x} - B_{\alpha} \rho V_{\alpha} y \dot{y} - 2\omega^2 z^2 - B_{\alpha} \rho V_{\alpha} z \dot{z} + 4(V_2^2 - V_D^2) - D\ddot{I}] / D, \quad (10)$$

где  $\omega$  – орбитальная угловая скорость движения связки;  $V_{\alpha}$  и  $V_{\kappa}$  – абсолютные скорости полета ЛКА и КА на орбите;  $V_2$  – относительная скорость ЛКА,  $V_2 = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ ;  $V_D = dD/dt = (x\dot{x} + y\dot{y} + z\dot{z}) / D$ .

Если в результате свободного движения ЛКА наступит момент времени  $t_n$ , когда выполнится условие  $D=l(t_n)=L$ , и при этом окажется, что  $(df/dt)_{t=t_n} < 0$ , то произойдет «удар ЛКА о связь».

Удар – это явление, происходящее в системе материальных точек, которое характеризуется изменением скоростей этих точек на конечную величину за очень малый промежуток времени  $\tau$  в результате кратковременного действия весьма больших сил [1, 3]. Эти силы называются ударными.

В рассматриваемом случае ударной силой является сила реакции натянутой связи  $\vec{R}$  [2]. За время  $\tau$  для реальной связи в виде связывающего троса будем принимать суммарное время его упругого растяжения за счет выхода ЛКА на натянутую связь и ответного упругого сжатия, которое является конечным.

Так как ударные силы велики и за малое время удара изменяются в значительных пределах, то в теории удара оперируют не с самими силами, а с импульсом этих сил, модуль которого является величиной конечной,

$$\vec{I} = \int_{t_n}^{t_k} \vec{R} dt,$$

где  $t_k = t_n + \tau$  – момент времени окончания удара;  $\|\vec{I}\|$  – матрица-столбец с проекциями импульса на оси координат.

Согласно теореме об изменении количества движения точки за время удара

$$m(\|\dot{r}_k\| - \|\dot{r}_n\|) = \int_{t_n}^{t_k} \lambda^* \|f\| dt. \quad (11)$$

Упругие свойства связи характеризуются коэффициентом восстановления  $\vartheta$  и не зависят от массы и скорости выхода точки на связь, а определяются лишь физическими свойствами троса. При этом значение коэффициента  $\vartheta$  лежит в пределах  $0 \leq \vartheta \leq 1$ .

В соответствии с [2] из выражения (11) можем записать формулу для определения скорости точки в конце удара

$$\|\dot{r}_k\| = \|\dot{r}_n\| - (1 + \vartheta) \|f^n\| (df/dt)^n / (\|f^n\|^T \|f^n\|). \quad (12)$$

При этом предполагалось, что соединяющий трос имеет такие упругие свойства, что при выходе ЛКА на связь со скоростью  $\dot{r}_n$  не происходит его обрыв, и ЛКА приобретает скорость  $\dot{r}_k$ , которая отличается от начальной не только по величине, но и по направлению.

При движении ЛКА с полностью выпущенным тросом выражение (12) в проекциях на оси системы координат преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \dot{x}^k &= \dot{x}^n - (1 + \vartheta) x^n V_D^n / L, \\ \dot{y}^k &= \dot{y}^n - (1 + \vartheta) y^n V_D^n / L, \\ \dot{z}^k &= \dot{z}^n - (1 + \vartheta) z^n V_D^n / L. \end{aligned} \quad (13)$$

Эти скорости являются начальными условиями для дальнейшего движения освободившегося со связи ЛКА внутри сферы радиуса  $L$ . При этом можно принять, что координаты ЛКА ( $x^n, y^n, z^n$ ) в ходе короткого удара не изменяются, так как его перемещение за малое время удара  $\tau$  будет иметь такой же порядок малости, как и время удара.

### Имитационное моделирование движения привязного ЛКА

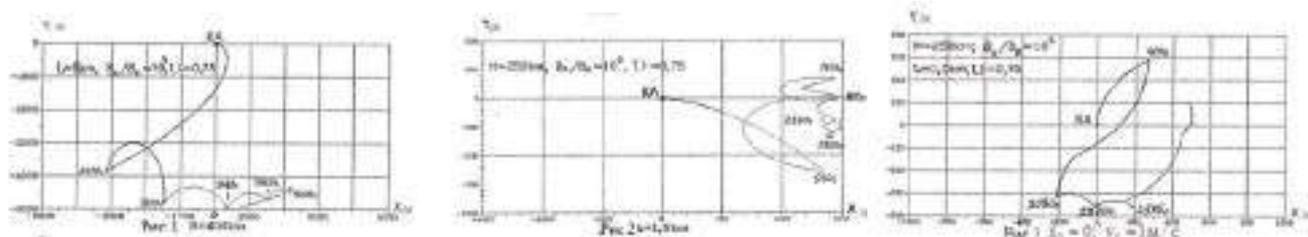
Для получения траекторий полета ЛКА на гибкой связке в орбитальной системе координат относительно центра масс связки разработана программа имитационного моделирования системы дифференциальных уравнений (6) на основе описанной математической модели движения связки.

Моделирование проводится в следующей последовательности:

1. Проверяются начальные (в момент времени  $t^{(0)} = t_0 = 0$ ) условия движения ЛКА, которые должны удовлетворять условию неударяющей связи  $f \geq 0$ . Если  $f^{(0)} > 0$  или  $\{f^{(0)} = 0, \text{ но } \dot{f}^{(0)} = (df/dt)|_{t=0} > 0\}$  или  $\{f^{(0)} = 0, \dot{f}^{(0)} = 0, \text{ но } \lambda_p \leq 0\}$ , то начальное движение ЛКА будет свободным и моделирование движения начинается по уравнениям (6) при  $\lambda^* = 0$ . Если  $\{f^{(0)} = 0, \text{ и } \dot{f}^{(0)} = 0, \text{ а } \lambda_p > 0\}$ , то начальное движение будет связанным и интегрирование (6) происходит при  $\lambda^* = \lambda_p$ , вычисленном по формуле (10) для данного момента времени.

2. Пусть в любой текущий момент времени движение ЛКА было свободным, а в следующий момент времени  $t_1$ , для которого  $f^{(t_1)} = 0$ , выполняются условия  $\{(df/dt)|_{t_1} = 0 \text{ и } \lambda_p > 0\}$ . Это означает, что связь плавно пришла в натянутое положение. С этого момента времени движение ЛКА будет связанным и интегрирование (6) осуществляется для  $\lambda^* = \lambda_p$ .

3. Если при свободном движении ЛКА в некоторый момент времени  $t_n$  выполнится условие  $f(t_n) = f_n = 0$  (ЛКА вышел на связь) и при этом окажется  $(df/dt)|_{t_n} < 0$ , то происходит удар ЛКА о связь. Для этого момента



времени рассчитывается скорость ЛКА, приобретаемая в результате удара согласно выражению (13) и являющаяся начальным условием для моделирования дальнейшего свободного движения ЛКА при  $\lambda^* = 0$ .

В рассматриваемом случае движение будет эволюционным (чередование свободного движения с выходами ЛКА на связь, ударами о связь и переходами в свободное движение). Продолжительность этого движения будет определяться значением коэффициента восстановления троса  $\vartheta$ .

4. Если в текущий момент времени движение КА и ЛКА было связанным, то в процессе интегрирования уравнений движения при  $\lambda^* = \lambda_p$  проверяется условие  $\lambda_p \leq 0$ . Как только оно выполнится, ЛКА плавно сходит со связи и дальше движется свободно по (6) при  $\lambda^* = 0$ . Далее проверяются условия выхода на связь по описанному выше алгоритму, и т.д.

Некоторые траектории движения ЛКА на связке приведены на рис. 1 и 2 – для нулевой скорости отделения ЛКА, и при  $\dot{y}_0 = 1$  м/с – на рис.3.

### Заключение

1. Проведенные расчеты подтверждают работоспособность предложенной математической модели, которая может быть использована для анализа особенностей движения привязного легкого КА при различных характеристиках тросовой системы и условиях его отделения.

2. В условиях полета с действием силы аэродинамического сопротивления и при достаточно упругом тросе движение привязного ЛКА является эволюционным с большим количеством изломов траектории. Для обеспечения строго фиксированной ориентации связки требуются исследования условий отделения ЛКА и выбор характеристик тросовой системы для обеспечения требуемого стационарного устойчивого положения связки к заданному моменту времени.

### Литература

1. Белецкий, В. В. Динамика космических тросовых систем / В.В. Белецкий, Е.М. Левин. – М.: Наука, 1990. – 329 с.
2. Иванов, В. А. Динамика полета системы гибко связанных космических объектов / В.А. Иванов, Ю.С. Ситарский. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
3. Бутенин, Н. В., Курс теоретической механики / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – СПб: Изд-во «Лань», 2004. – 736 с.

## Перспективы развития конструкций космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса

### Prospects for the development of space erectable antennas on the basis of a truss structure

#### Бондарев / Bondarev A.

Андрей Вячеславович  
(andrey.bondarev@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
начальник расчетно-исследовательского отдела.  
г. Санкт-Петербург

#### Блинов / Blinov A.

Александр Филиппович  
(alexander.blinov@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
начальник конструкторского отдела.  
г. Санкт-Петербург

#### Артамонов / Artamonov S.

Станислав Владимирович  
(stanislav.artamonov@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
ведущий инженер-конструктор  
расчетно-исследовательского отдела.  
г. Санкт-Петербург

#### Недашковская / Nedashkovskaya E.

Евгения Сергеевна  
(eugenia.nedashkovskaya@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер-конструктор 2-й категории  
расчетно-исследовательского отдела.  
г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** космическая самораскрывающаяся антенна – space erectable antenna; ферменно-стержневой каркас – truss-core framework; полномасштабный макет рефлектора – reflector full-scale prototype; фрагмент сетеполотна – mesh dish piece.

Описаны конструктивные особенности космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса, их достигнутый технический уровень и ряд недостатков. Приведена конкретная разработка и реализация макета крупногабаритного рефлектора. Определены задачи дальнейшего проработок по усовершенствованию конструкций этого типа, а также результаты проведенных исследований.

Design features, engineering level and a number of shortcomings of the space erectable antennas based truss-core framework are described. The development and the implementation of a large-sized reflector prototype are given. The further goals of the design improvement and the conducted research results have been determined.

При отработке принципиальных конструктивных решений и компоновочных вариантов конструкций космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса (ФСР) Особым конструкторским бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭИ) создано несколько модификаций ферменной конструкции размером 5 и 6 метров. Конструкции предназначены для использования в системах космического базирования в качестве складной транспортательной антенны.

Основу каркаса составляют: узловые шарнирные соединения, складывающиеся стержни, диагональные стержни. Фрагмент ФСР рефлектора представлен на рис. 1.

В развернутом положении стержни ФСР сходятся в узловых шарнирных соединениях 1, которые расположены на двух криволинейных поверхностях. В каждом узловом шарнирном соединении сходятся по три диагональных стержня 4, обеспечивающих связь узловых точек вогнутой и выпуклой поверхностей каркаса, а также по шесть складывающихся стержней 3, которые образуют ячейки поверхностей рефлектора. Складывающиеся стержни вогнутой стороны образуют отражающую поверхность (ОП), к которой крепится трикотажное сетеполотно из микропроволоки. Складывающиеся стержни 3 имеют в середине шарниры 2 с пружинами. Базовая ячейка вогнутой и выпуклой сетей поверхности – треугольник, образованный тремя складывающимися стержнями, а базовая ячейка ФСР – тетраэдр, образованный тремя диагональными стержнями и тремя складывающимися стержнями. Весь ФСР образуется повторением этих базовых ячеек. Необходимый профиль поверхности образуется за счёт разной длины складывающихся стержней вогнутой (отражающей) и выпуклой (тыльной) сети. Длина всех диагональных стержней одинакова.

При свертывании рефлектора стержни отражающей и тыльной сети поворачиваются в узловых шарнирах и шарнирах складывающихся стержней, убираются внутрь ФСР. Диагональные стержни поворачиваются в своих шарнирах узловых шарниров и сближаются.

Габаритный размер укладки по высоте определяется длиной диагональных стержней. Поперечные габаритные размеры укладки рефлектора определяются возможностями наиболее тесного расположения диагональных стержней, шарниров складывающихся стержней и самих складывающихся стержней.

Достигнутый технический уровень выявил и ряд недостатков конструкций:

- высокая удельная масса конструкций – около 2 кг/м<sup>2</sup>;
- точность аппроксимации поверхности, определяемая плоскими треугольными элементами из-за крепления сетеполотна ОП непосредственно к узлам и стержням каркаса;
- снижение точности профиля ОП из-за отсутствия фиксации формы каркаса в развернутом положении;
- сборка каркаса на стапеле с применением силовых операций, не исключающая появления напряжений и последующих деформаций;
- развертывание только за счет энергии сжатых пружин шарнирных устройств.

Современные требования по повышению точности ОП и увеличению размеров рефлекторов при сохранении габаритных размеров укладки и массы рефлектора уже не могут быть достигнуты на имеющейся элементной базе, и определили задачи дальнейших разработок по усовершенствованию конструкций:

- снижение удельной массы конструкций до 1,0...1,2 кг/м<sup>2</sup>;
- уменьшение динамических нагрузок на стыке рефлектора с космическим аппаратом (КА);
- повышение надежности фиксации формы каркаса в развернутом положении;
- уменьшение напряжений в элементах конструкции и повышение надежности при развертывании за счет введения управляемого развертывания.

В 2009 году перед АО "НЦПЭ" была поставлена задача создания полноразмерного макета рефлектора (ПМР) космической самораскрывающейся антенны на основе ФСК с размером ОП 12,1x4,1 м, фокусным расстоянием 5,0 м и среднеквадратическим отклонением (СКО) ОП ≈ 1,5 мм. При схожести конструктивного исполнения с уже

существующими конструкциями на основе ФСК в целом, учитывая возросшие размеры рефлектора, был внесен ряд существенных изменений в конструкцию, в том числе:

- для повышения надежности развертывания значительно увеличена энергия пружин, за счет которых происходит развертывание рефлектора;
- для снижения динамических нагрузок при развертывании рефлектора введено контролируемое развертывание;
- для снижения СКО ОП введено развертывание складывающихся стержней на расчетный угол, меньший 180°.

Исследования и результаты экспериментов АО "НЦПЭ" завершены в 2012 году разработкой и изготовлением полноразмерного макета. По результатам проведенных исследований и экспериментов определены состав и структура ФСК ПМР, приведенные на рис. 2. Основные соединительные элементы конструкции показаны на рис. 3. Общий вид ПМР в свернутом и развернутом положениях приведен на рис. 4. КЭМ рефлектора в ПК «ANSYS» – на рис. 5.

Рассматриваются пути решения сформулированных выше задач, а именно:

- повышение точности профиля ОП разбиением на треугольные элементы требуемого размера за счет уменьшения длин стержней или применением профилированных стержней при сохранении габаритов укладки, а также с применением оттяжек сетеполотна к тыльной поверхности рефлектора;
- оптимизация геометрии ФСК рефлектора и характеристик элементов по поясам конструкции за счет применения полномасштабного математического моделирования;
- использование новых конструкционных материалов с наилучшим сочетанием физико-механических и теплофизических характеристик;
- разработка способов управляемого развертывания;
- разработка способов надежной фиксации формы каркаса в развернутом положении.

Следующим этапом работы стала проработка рефлектора с малым фокусным расстоянием. Рефлекторы с меньшим фокусным расстоянием имеют ряд конструктивных преимуществ, но в соответствии с формулой

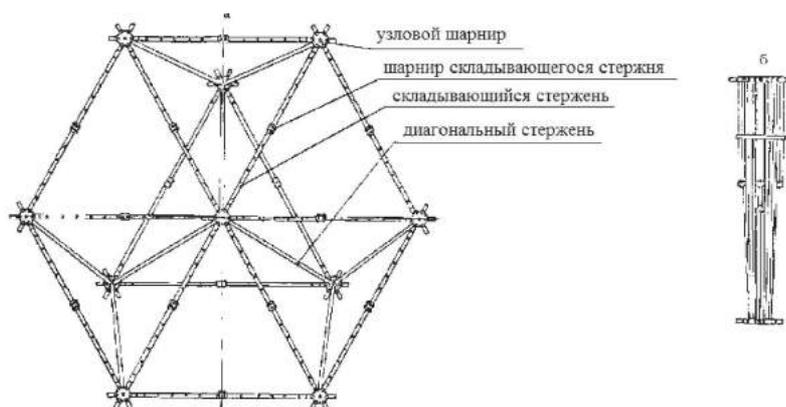


Рис. 1. Фрагмент ФСК рефлектора:  
а – развернутое положение; б – свернутое положение

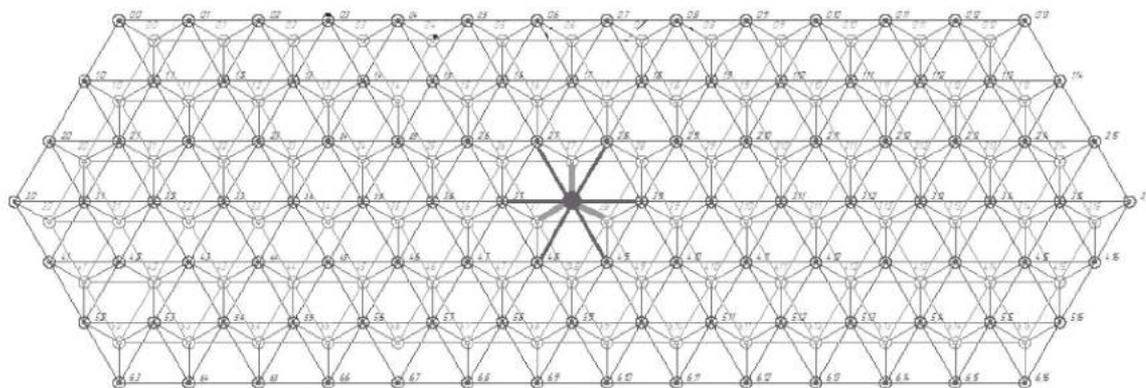


Рис. 2. Состав и структура ФСК ПМР

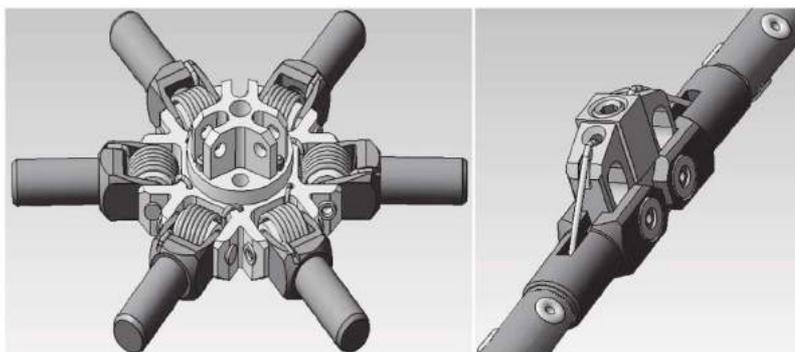


Рис. 3. Корпус в сборе и стержень складывающийся лицевой

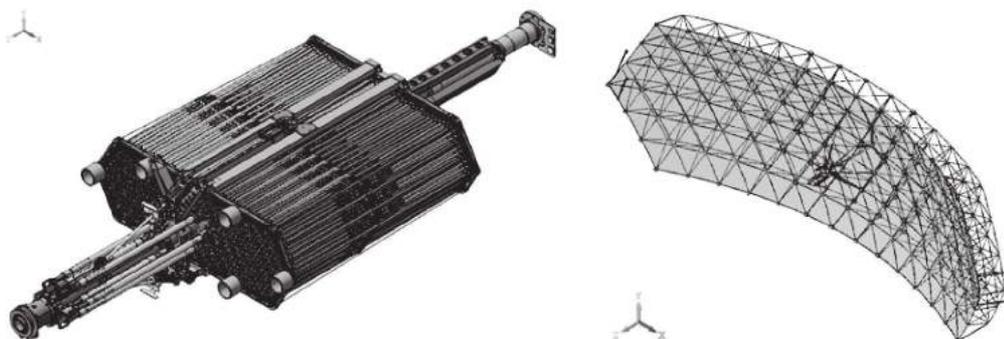


Рис. 4. Общий вид ПМР в свернутом и в развернутом положении  
(3D-модель в ПК КОМПАС)

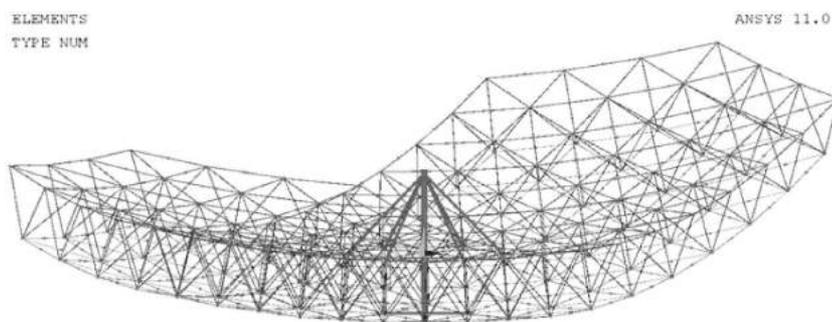


Рис. 5. Конечно-элементная модель рефлектора в ПК «ANSYS»

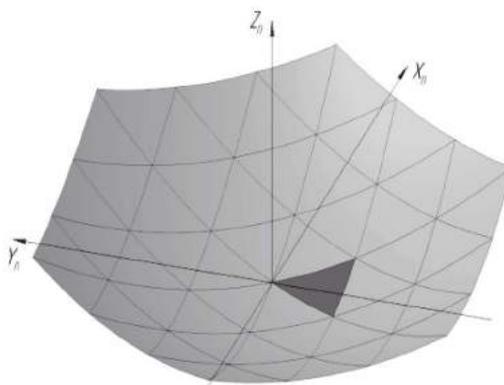


Рис. 6. Рефлектор и его фрагмент

Таблица 1

**Результаты измерений СКО рефлектора от параболоида сравнения при длине стороны фрагмента ОП 800 мм**

Номер эксперимента	Параметры параболоида сравнения					Примечания
	F	X <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	Z <sub>0</sub>	СКО	
1	2000	0	0	0	3,139	Без оттяжек. Измерения индикатором часового типа Horex
	1929	0	0	0	2,773	
	2851	12,7	228,9	11,1	1,871	
2	2000	0	0	0	2,279	1 оттяжка. Измерения индикатором часового типа Horex
	1964	0	0	0	2,154	
	2552	-3,8	150,6	7,5	1,616	
3	2000	0	0	0	1,920	4 оттяжки. Измерения индикатором часового типа Horex
	1966	0	0	0	1,790	
	2398	-6,9	115,2	6,1	1,340	
4	2000	0	60	-0,45	4,386	Без оттяжек. Измерения лазерным трекером Leica AT960
	1881	0	60	-0,45	2,804	
	3496	-26,2	399,2	13,6	1,130	
5	2000	0	60	-0,45	2,182	4 оттяжки. Измерения лазерным трекером Leica AT960
	1958	0	60	-0,45	1,307	
	2265	-23,1	124,8	2,00	0,852	



Рис. 7. Лазерный трекер Leica AT960

(1) имеют большее СКО поверхности от теоретического параболоида.

$$\sigma = 0,0161d^2/F, \quad (1)$$

где  $d$  – сторона треугольной ячейки;  $F$  – фокусное расстояние.

Проведены исследования с целью выявления влияния дополнительных оттяжек на значение СКО фрагмента ОП сетеполотна от поверхности теоретического параболоида. Натурному обмеру подвергался фрагмент рефлектора как с прежней длиной стороны 800 мм (рис. 6), так и с длиной стороны 600 мм. Для уменьшения СКО поверхности, трубки, образующие треугольный фрагмент рефлектора, изогнуты таким образом, чтобы радиус их кривизны совпадал с местным радиусом кривизны теоретического параболоида.

Для проведения исследования изготовлен экспериментальный стенд, разработана методика проведения натурального эксперимента. В центр ячейки сетеполотна вводилось от одной до четырёх оттяжек, которые притягивали сетеполотно к поверхности теоретического параболоида. Измерение формы поверхности сетеполотна проводилось двумя способами: индикатором часового типа Нолех и лазерным трекером Leica AT960 (рис. 7).

Разработаны расчётные программы, позволяющие обрабатывать результаты измерений и определять СКО рефлектора от параболоида сравнения, а также строить картограммы отклонений поверхности рефлектора от поверхности параболоида сравнения.

В результате проведения измерений индикатором часового типа Нолех установлено, что поверхность отклонений имеет ярко выраженную "подушкообразную" форму. Этот эффект известен и описан, в частности, в [1].

Идеальной с точки зрения минимизации СКО была бы плоская поверхность отклонений, и, чтобы ее добиться, были введены оттяжки. По данным обмеров индикатором часового типа Нолех уменьшение СКО составляет приблизительно 25%. По данным измерений лазерным

трекером Leica AT960, с последующей обработкой по разработанной методике, уменьшение СКО составляет приблизительно 55%.

В результате измерений и их обработки получены следующие результаты:

- для рефлектора с фокусным расстоянием 2,0 м и длиной стороны фрагмента ОП 800 мм без оттяжек СКО поверхности составляет 3,2...4,4 мм, с оттяжками минимально достигнутое СКО ОП от теоретического параболоида составляет 1,2 мм;

- для рефлектора с фокусным расстоянием 2,0 м и длиной стороны фрагмента ОП 600 мм без оттяжек СКО составляет 1,4 мм, с оттяжками минимально достигнутое СКО ОП  $\approx 0,9$  мм.

Достигнутое значение СКО ОП при погрешности  $\lambda/20$  ( $\lambda$  – длина волны) соответствует применению таких конструкций на частотах до 20 ГГц.

### Заключение

Несмотря на достигнутые значительные успехи в области проектирования самораскрывающихся конструкций [2], важной остается задача обеспечения плавного и надежного развертывания крупногабаритных конструкций, прежде всего ферменного типа, состоящих из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных между собой шарнирами элементов, при гарантированном обеспечении их последующего функционирования, с точки зрения критерия надежности.

Реализованные разработки и проведенные исследования способов снижения СКО ОП рефлекторов на основе ФСК подтверждают возможность их применения в антенной технике в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн.

### Литература

1. Гряник, М. В. Развёртываемые зеркальные антенны зонтичного типа. Москва / М.В. Гряник. – Радио и связь, 1987. – 72 с.
2. Зимин, В. Н. Механика трансформируемых структурных космических конструкций / В.Н. Зимин // Вестник самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4 (54). – С. 105–114.

## Определение координат точек профиля контррефлектора двухзеркальных антенн на основе данных о профиле основного зеркала

### The subreflector profile points coordinates finding on the basis of the main mirror profile data in double-reflector antennas

#### Хабиров / Khabirov D.

Денис Олегович

(d.khabirov@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
заместитель начальника отдела антенно-фидерных устройств.

г. Санкт-Петербург

#### Радченко / Radchenko A.

Антон Александрович

(a.radchenko@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер 1-й категории отдела антенно-фидерных устройств.

г. Санкт-Петербург

#### Кочубей / Kochubey D.

Даниил Русланович

(Daniil.kochubey@scaegroup.com)

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики»,  
магистр.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** коэффициент использования поверхности – the surface usage coefficient; гравитационные деформации – gravity deformation; профиль контррефлектора – second mirror profile; геометрическая оптика – the geometric optics.

Предложен и описан способ определения координат точек профиля контррефлектора двухзеркальных антенн на примере антенной системы П-2500. В качестве исходных данных используются координаты точек поверхности основного зеркала. С помощью данного способа может быть решена трехмерная задача, в отличие от существующего решения, полученного только для сечения поверхности основного зеркала вертикальной плоскостью.

The second mirror surface points coordinates finding method has been suggested and written in this article with example of antenna system P-2500. The main reflector surface points coordinates are using as the basic data. The 3-D task can be solved with using of this method whereas classic solution has been obtained only for the main reflector surface section with a vertical plane.

#### Постановка задачи

При работе на малых и средних углах места в коротковолновой части сантиметрового, а также в миллиметровом диапазонах длин волн, остро проявляется проблема снижения коэффициента использования

поверхности (КИП) апертуры наземных полноповоротных крупногабаритных антенн. Это обусловлено, в первую очередь, влиянием сил гравитации на крупномасштабные искажения формы отражающих поверхностей антенных систем (АС) [1]. Задача максимизации КИП апертуры крупногабаритных антенн является одной из наиболее важных в ходе проектирования новых и модернизации существующих антенн данного класса.

Современные антенны, для которых гравитационные деформации оказывают существенное влияние на снижение КИП апертуры, построены в соответствии с идеей гомологических деформаций С. Хорнера [2]. Применительно к антенной системе П-2500 (радиотелескоп РТ-70) данный принцип формулируется с поправкой на то, что основное зеркало антенной системы не является параболическим. Антенная система П-2500 построена по модифицированной схеме Грегори и состоит из двух отражающих поверхностей – квазипараболоида вращения (основное зеркало) и квазиэллипсоида вращения (контррефлектор), – каждая из которых сама по себе не имеет геометрического фокуса [3]. Таким образом, рассматривать гравитационные деформации основного зеркала без учета положения контррефлектора не представляется возможным. При этом искажения формы контррефлектора при воздействии сил гравитации не рассматриваются в силу их малости [1].

Задача оптимизации антенной системы (т.е. повышения КИП ее апертуры и, соответственно, коэффициента усиления) сводится к следующему. Необходимо

определить положение контррефлектора, которое в условиях искаженного профиля и смещенного положения основного зеркала позволит обеспечить максимальную плотность потока мощности электромагнитного поля в области фазового центра облучателя (в режиме приема). Таким образом, изменением положения контррефлектора можно добиться минимизации негативного влияния гравитационных деформаций основного зеркала на общее значение коэффициента усиления антенной системы [1].

Решение данной задачи может быть основано, прежде всего, на определении математической связи между известными (например, на основании прямых измерений) координатами точек профиля основного зеркала и искомыми координатами точек профиля контррефлектора.

### Алгоритм определения координат точек профиля контррефлектора

С учетом имеющихся возможностей исследования поставленной задачи (в частности, отсутствие доступа к проектной документации антенной системы П-2500 у авторов статьи), решение может быть получено на основе известных данных о геометрических параметрах антенной системы. Эти данные представляют собой массив координат точек (351 точка) профиля основного зеркала, а также расчетные коэффициенты для определения поправок к координатам, возникающих вследствие гравитационных деформаций.

Классическая методика расчета геометрических параметров двухзеркальной антенной системы (без учета деформаций) представлена в работе [4], при этом рассматривается двумерная задача.

На рис. 1 представлена оптическая схема антенны П-2500. Кривая  $OM$  – профиль основного зеркала (т.е. сечение основного зеркала вертикальной плоскостью); кривая  $KP$  – профиль контррефлектора; точка  $A$  – фокус двухзеркальной системы. Ось симметрии антенны совпадает с осью координат  $OX$ .

Пусть в направлении, противоположном направлению оси  $OX$ , распространяется плоская волна. Луч  $DC$  исходит из произвольно выбранной точки  $D$  на плоском фронте волны (в целях удобства расчета следует выбрать фронт  $DK$ , проходящий через вершину контррефлектора  $K$ ). Отражаясь от основного зеркала в точке  $C$  под углом  $\gamma$ , луч далее попадает на точку  $B$  контррефлектора. После отражения от контррефлектора под углом  $\beta$  луч приходит в точку фокуса  $A$  двухзеркальной системы.

Обозначив длины отрезков  $OK$ ,  $AK$ ,  $DC$ ,  $CB$ , и  $BA$  как  $h$ ,  $g$ ,  $s$ ,  $l$ , и  $r$  соответственно, можно записать систему уравнений для расчета координатам точек профиля контррефлектора.

$$\begin{cases} r + l + s = g + 2h; \\ 2\gamma = 2\beta + \varphi; \\ y_c = f \sin \varphi; \\ x_c = h - g + r \cos \varphi - l \cos 2\gamma; \\ r \sin \varphi + f \sin \varphi = l \sin 2\gamma; \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\varphi} = \operatorname{tg} \beta, \end{cases} \quad (1)$$

где  $y_c$  и  $x_c$  – координаты точки  $C$  на профиле основного зеркала,  $f$  – фокусное расстояние эквивалентного параболоида.

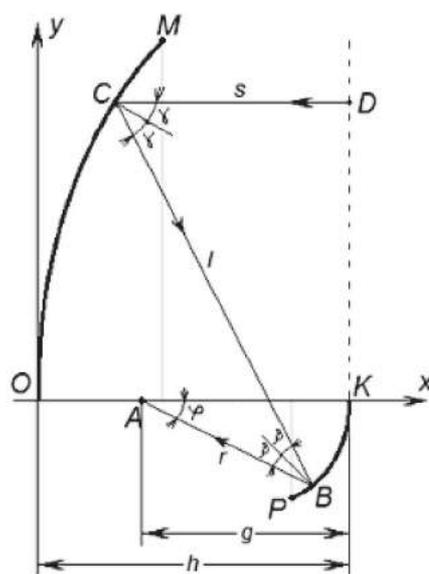


Рис. 1. Оптическая схема антенны П-2500

Здесь первое уравнение обозначает равенство всех оптических путей от фронта  $DK$  до точки фокуса  $A$ ; второе получается из законов аналитической геометрии; третье уравнение – это условие синусов Аббе; четвертое и пятое определяют проекции отрезков лучей на оси координат. Последнее уравнение определяет направление нормали к кривой профиля контррефлектора [4].

В результате решения системы (1) можно получить координаты точек профиля контррефлектора по известным координатам точек профиля основного зеркала и найти соответствующие этим точкам оптические пути. Однако возникающие при этом трудности чисто аналитического характера (в частности, при решении системы нелинейных уравнений, включая дифференциальное, а особенно при рассмотрении трехмерной задачи) определяют необходимость развития методик, ведущих к ускорению и упрощению решения и не приводящих к снижению точности результата.

В качестве альтернативного способа определения координат точек профиля контррефлектора предлагается следующий алгоритм, основанный на приближении геометрической оптики.

Прежде всего, необходимо определить углы отражения падающей волны в точках профиля основного зеркала. Направление нормали  $\vec{n}_{C_n}$  в каждой из известных точек  $C_n$  (для вершины профиля индекс  $n = 0$ , а для крайней точки –  $n = 350$ ) находится путем следующего способа аппроксимации кривой  $OM$ : выбираются по три смежные точки, и через них проводится дуга окружности (рис. 2). Перпендикуляр, восставленный к полученной дуге в средней из трех выбранных точек, будет совпадать (с некоторой погрешностью аппроксимации) с направлением нормали  $\vec{n}_C$  в этой точке.

Для крайней точки  $C_{350}$  (точка  $M$  на рис. 1) направление нормали и, соответственно, оптический путь не определяются.

Зная направления нормалей для всех точек  $C_n$  профиля основного зеркала, можно найти углы отражения  $\gamma_n$ :

$$\gamma_n = \left( \vec{n}_{C_n}, \vec{Ox} \right) \quad (2)$$

Длина отрезка  $DC$  (см. рис. 1) определяется следующим выражением:

$$s_n = h - x_{C_n}.$$

С учетом первого уравнения системы (1), сумма длин отрезков  $AB$  и  $BC$  равна:

$$(r+l)_n = g + 2h - s_n = g + h + x_{C_n}.$$

Далее, основываясь на известных значениях суммы  $(r+l)_n$  и координат точек  $A$  и  $C_n$ , для каждой известной точки профиля основного зеркала, можно построить эллипс с фокусами  $A$  и  $C_n$  и следующими параметрами:

– фокальное расстояние

$$c_n = \frac{AC_n}{2} = \frac{\sqrt{(x_{C_n} - (h-g))^2 + y_{C_n}^2}}{2};$$

– большая полуось

$$a_n = \frac{(r+l)_n}{2} = \frac{g + h + x_{C_n}}{2}.$$

Пример описанного построения эллипса показан на рис. 3.

Множество точек пересечения эллипсов, полученных для всех известных точек профиля основного зеркала  $C_n$ , с соответствующими им лучами  $l_n$ , определяет (с учетом приближения геометрической оптики и погрешности аппроксимации (2)) требуемые профиль и положение контррефлектора (в виде дискретных точек) в рассматриваемой антенной системе. Полученный профиль контррефлектора определяет сходимость в одной точке  $A$  (фокусе системы) всех лучей, падающих на основное зеркало от плоского фронта волны.

На рис. 4 показаны лучи  $l_n$ , отраженные от основного зеркала (стрелками указано направление лучей

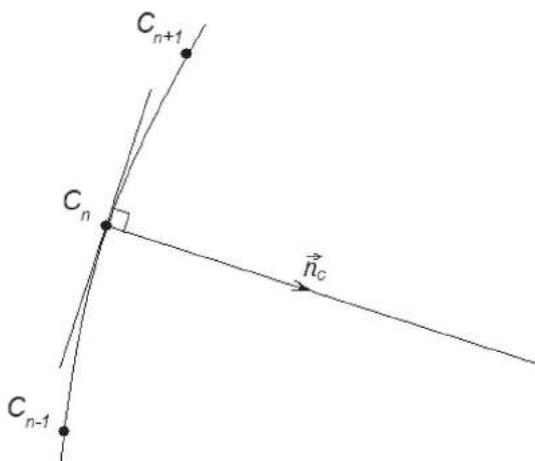


Рис. 2. Нормаль к кривой профиля основного зеркала в точке  $C_n$

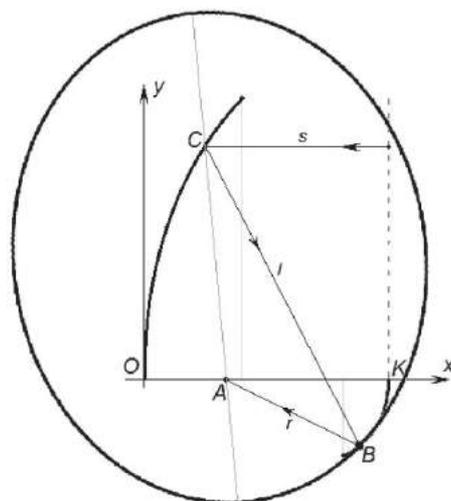


Рис. 3. Пример построения эллипса и определения точки В профиля контррефлектора

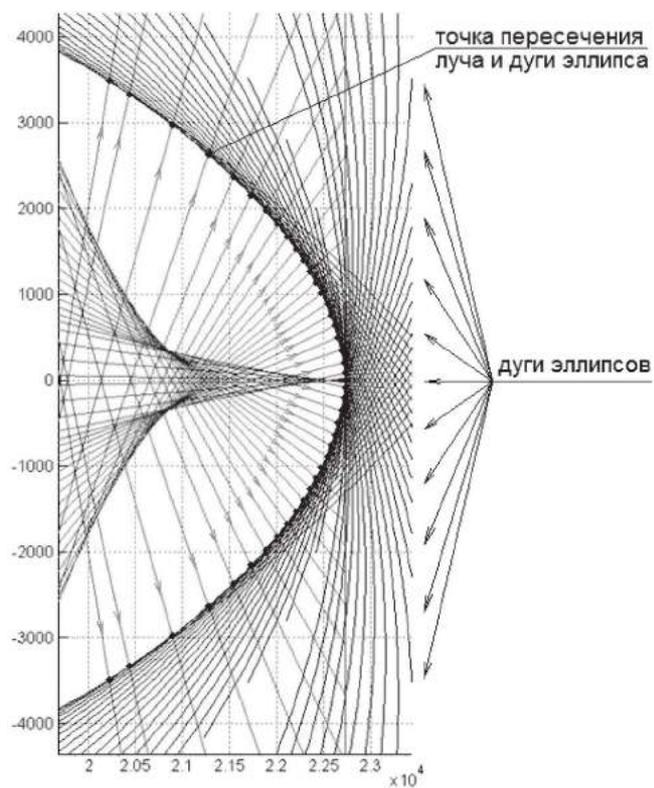


Рис. 4. Построение дуг эллипсов и отраженных от основного зеркала лучей (координаты в мм)

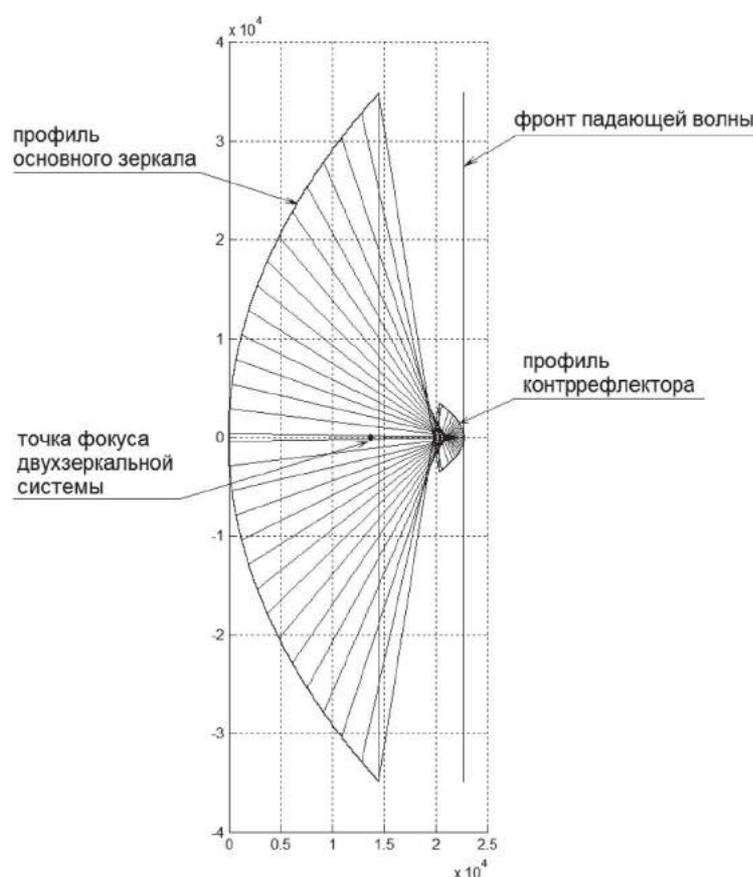


Рис. 5. Построенная оптическая схема антенной системы П-2500 (координаты в мм)

$l_n$ ), а также дуги эллипсов, определенные в области вероятного пересечения с лучами  $l_n$ . Также показаны точки пересечения лучей и дуг эллипсов

На рис. 5 показана построенная описанным способом оптическая схема антенной системы П-2500 в виде точек профилей основного зеркала и контррефлектора. Также на рис. 5 частично показаны оптические пути падающей волны и обозначен фронт падающей волны.

### Заключение

Авторами статьи предложен и описан способ определения координат точек профиля контррефлектора двухзеркальных антенн на примере антенной системы П-2500, основанный на приближении геометрической оптики. В частности, определена математическая связь между координатами точек профиля основного зеркала и координатами точек профиля контррефлектора. В результате применения описанного способа построена в виде дискретных точек оптическая схема антенной системы П-2500 (на основе имеющихся данных в виде массива координат точек профиля основного зеркала).

Описанный способ также позволяет получить решение трехмерной задачи посредством объединения решений для нескольких сечений отражающей

поверхности основного зеркала. Таким образом, при наличии данных о реальном состоянии отражающей поверхности можно наиболее эффективно производить подстройку положения контррефлектора с целью минимизации негативного влияния гравитационных деформаций основного зеркала на величину коэффициента использования поверхности (КИП) апертуры наземных крупногабаритных полноповоротных антенн.

### Литература

1. Гурбанязов, М. А. Современные проблемы построения зеркальных антенн / М.А. Гурбанязов, А.Н. Козлов, В.Б. Тарасов; Отв. ред. чл. корр. АН СССР Л.Д. Бахрах. – А.: Ылым, 1992. – 416 с.
2. Von Hoerner, Sebastian. Homologous Deformations of Tilttable Telescopes / Sebastian von Hoerner // Journal of the Structural Division, ASCE. – 1967. – Vol. 93, No. ST5. – P. 461–485.
3. Козлов, А. Н. Гигант смотрит во Вселенную / А.Н. Козлов // Наука и жизнь. – 1982. – № 3. – С. 2–11.
4. Бахрах, Л. Д. Зеркальные сканирующие антенны: Теория и методы расчета / Л.Д. Бахрах, Г.К. Галимов. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 304 с.

## Применение гибридного ММ-КРВО метода для анализа излучения тонкопроволочных структур

### Application of the hybrid MoM-FDTD method for the analysis of radiation of thin-wire structures

**Бородулин / Borodulin R.**

Роман Юрьевич

(roman.borodulin@scaegroup.com)

кандидат технических наук.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
старший научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

**Щесняк / Shchesnyak S.**

Сергей Степанович

(sergey.schesnyak@scaegroup.com)

доктор технических наук, профессор.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
генеральный директор.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** метод моментов – the method of moments; метод конечных разностей во временной области – the method of finite differences in the time domain; модель возбуждения – the excitation model; дискретное преобразование Фурье – the discrete Fourier transform.

В статье предлагается вариант совместного применения двух различных численных методов электродинамики – метода моментов (ММ) и метода конечных разностей во временной области (КРВО) для взаимного расширения их возможностей. На основе анализа математического аппарата ММ и метода КРВО, имеющего между собой существенные различия, показано, что ток, рассчитанный ММ, можно приближенно аппроксимировать предложенным способом в виде источников магнитного поля, задаваемых в алгоритме КРВО. Для вывода конечных результатов моделирования в методе КРВО предложен разработанный математический аппарат, основанный на дискретном преобразовании Фурье. Данный аппарат позволяет автоматически регулировать точность выводимых комплексных амплитуд путем регулирования числа временных шагов. Проверка предложенных решений производится на примере результата взаимодействия тонкого симметричного вибратора, рассчитанного ММ, с частично перекрывающим его экраном, моделируемым методом КРВО.

The article proposes a variant of joint application of two different numerical methods of electrodynamics – the method of moments (MoM) and the method of finite differences in time domain (FDTD) for mutual expansion of their capabilities. On the basis of an analysis of the mathematical apparatus of the MoM and the FDTD method, which has significant differences, it was shown that the current calculated by the moment method can approximately be approximated by the method proposed in the article in the form of magnetic field sources specified in the FDTD algorithm. To derive the final results of modeling in the FDTD method, a developed mathematical apparatus based on the discrete Fourier transform is proposed. This unit allows to automatically adjust the accuracy of output complex amplitudes by adjusting the number of time steps. Verification of the proposed solutions is made on the example of the result of the interaction of a thin symmetrical vibrator, calculated by the method of moments with a partially overlapping screen, modeled by the FDTD method.

### Введение

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) антенн невозможно представить без входящих в их состав численных методов. Основные методы, применяемые в задачах электродинамики, основаны на дискретизации пространства. Это метод моментов (ММ) (method of moments (MoM), англ.) [1], метод конечных элементов (МКЭ) (finite element method (FEM), англ.) [2] и метод конечных разностей во временной области (КРВО) (finite difference time domain method (FDTD), англ.) [3].

Метод моментов основан на решении интегральных уравнений Фредгольма 1-го или 2-го рода. Наибольшее развитие получила тонкопроволочная аппроксимация, которая приводит к интегро-дифференциальным уравнениям Поклингтона или Галлена [4]. Метод конечных элементов основан на решении неоднородного векторного уравнения Гельмгольца для одного из векторов электромагнитного поля. Метод КРВО основан на конечно-разностной аппроксимации уравнений Максвелла в дифференциальной форме. Рассмотрим возможность совместного использования ММ и КРВО.

Любому из перечисленных методов присущи свои достоинства и недостатки. Главным общим недостатком является зависимость точности решения задач от отношения размеров дискретизационных ячеек к длине волны.

Метод КРВО является популярным методом, в силу его наглядности и простоты. К сожалению, недостатком является кубическая аппроксимация анализируемых моделей, что приводит к достаточно грубому представлению исследуемых структур. Это вызвано необходимостью присвоения определенным ячейкам КРВО свойств, например металла, для построения моделей, в то время как сами ячейки имеют конечные размеры, определяемые из условия сходимости Куранта-Фридрихса-Леви [6]. Выходом является построение неэквидистантных сеток, которое большого развития не получило.

Метод моментов позволяет анализировать замкнутые электродинамические структуры, например поверхность проволочных антенн. К сожалению, влияние на излучение произвольных объектов, находящихся в ближней зоне моделируемых излучателей, в ММ невозможно, поскольку требует постоянной модификации ядра, что недопустимо.

Предлагается использовать сильные стороны ММ и КРВО путем объединения электродинамических моделей рассматриваемым ниже способом.

### Метод моментов и тонкопроволочная аппроксимация

Принцип действия ММ основан на общем для всех сеточных методов процессе дискретизации излучающей структуры, применении систем базисных и пробных функций различного вида с целью приведения исходного интегрального уравнения к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Базовой частью метода является формирование «матрицы взаимных сопротивлений» (матрицы импедансов), учитывающей взаимное расположение взаимодействующих сегментов, на которые разбивается излучающая система (ИС). Производится учет граничных условий (ГУ) для касательных составляющих вектора электрического поля на идеальном проводнике в зависимости от ориентации ИС в пространстве. Вектор правых частей СЛАУ учитывает влияние источника (модели возбуждения) на один или несколько сегментов.

Подробно ММ описан в [7], а также в других источниках. Обобщение, новые подходы для реализации лучшей сходимости метода имеются в монографии [6].

Основой решения уравнений ММ является выбор специальных базисных функций (БФ), от которых зависит как скорость сходимости, так и потребляемый ресурс ЭВМ. Моделируемая проволочная структура

представляется совокупностью взаимодействующих сегментов, взаимные сопротивления между которыми формируют матрицу взаимных импедансов. Данная матрица является основой СЛАУ вида

$$\begin{bmatrix} f(z_1, z'_1) & f(z_1, z'_2) & \dots & f(z_1, z'_N) \\ f(z_2, z'_1) & f(z_2, z'_2) & \dots & f(z_2, z'_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(z_N, z'_1) & f(z_N, z'_2) & \dots & f(z_N, z'_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_z^i(z_1) \\ E_z^i(z_2) \\ \vdots \\ E_z^i(z_N) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Решение СЛАУ в символьном записывается как

$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m]. \quad (2)$$

Кусочно-синусоидальный базис более корректно передает истинное распределение тока  $I(l)$  вдоль длины  $l$  симметричного проволочного вибратора, в сравнении с кусочно-постоянным, за счет равенства нулю тока на концах проводника, т.е. корректных граничных условиях (рис. 1).

Таким образом, в ММ находятся комплексные амплитуды токов с учетом геометрии исследуемой структуры. Зная их, можно находить различные электрические характеристики антенн, такие как входное сопротивление и диаграмма направленности, но без учета возможных неоднородностей, находящихся вблизи исследуемой модели.

### Метод КРВО и разностное представление токов

Метод КРВО является одним из немногих методов, позволяющих моделировать процесс дифракции, разворачивающийся во времени [3]. В последнее время был развит математический аппарат идеально-согла-

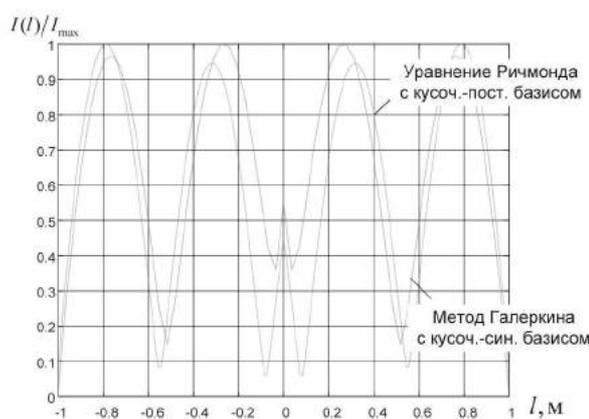


Рис. 1. Распределения токов вдоль симметричного вибратора общей длиной  $l = 1$  на частоте 300 МГц, полученные на основе уравнения Поклинтгона [6, 7, 10]

сованных слоев (perfectly matched layers, PML [8]), который позволил существенно уменьшить размеры расчетной области, увеличив скорость прохождения алгоритмов.

Поскольку метод КРВО моделирует разворачивающийся во времени процесс, для него характерно пространственно-временное представление векторов электромагнитного поля. Векторные компоненты образуют систему шести скалярных уравнений в трехмерной декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' H_x \right); \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho' H_y \right); \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right); \\ \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right); \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right); \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Система дифференциальных уравнений в частных производных (3) является основой алгоритма КРВО (алгоритма Йи) [9]. В случае рассмотрения двумерного или одномерного пространства система (3) лишается части членов и значительно упрощается.

Центральной частью алгоритма является расчет компонент поля во времени. Так, каждая компонента для поля  $E$  вычисляется из рассчитанных перед этим компонент поля  $H$ , хранящихся в памяти компьютера, а все компоненты поля  $H$  – из компонент поля  $E$ , также хранящихся в оперативной памяти. Данный процесс повторяется в течение заданного числа шагов вплоть до некоторого желаемого времени отклика системы, пока не будет достигнуто, например, устойчивое состояние.

Для обеспечения стабильности и устойчивости алгоритма КРВО требуется выбирать временной шаг, исходя из следующего условия:

$$\Delta t \leq \left( c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Условие (4) получено Курантом и др. [9]. При таком подходе сначала решается задача выбора временного шага, а уже после этого формируется сетка разбиения. Для трехмерного случая неравенство (4) можно привести к виду

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{c\sqrt{3}}. \quad (5)$$

В методе КРВО источники могут зависеть от значений составляющих окружающего поля (мягкие источники), либо не зависеть от них (жесткие источники). Источник гармонического поля, используемый, например, в качестве модели возбуждения антенны задается выражением

$$f(t) = E_0 \sin(2\pi f \Delta t n), \quad (6)$$

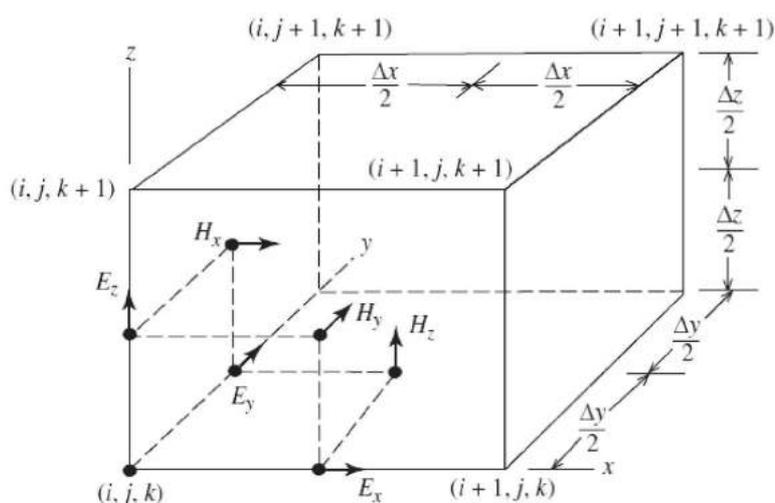


Рис. 2. Позиции компонент электрического и магнитного полей в кубической КРВО-ячейке размером  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$

где  $E_0$  – амплитуда гармонического сигнала.

Данный источник является самым простым и причисляется к разряду «жестких», так как возбуждение производится без учета значений поля, полученных на предыдущих шагах. В отличие от выражения (6) формула «мягкого» источника гармонических колебаний выглядит

$$E_z^n(x_0, y_0, z') = E_z^n(x_0, y_0, z') + E_0 \sin(2\pi fn), \quad (7)$$

где  $x_0, y_0, z'$  – координаты области возбуждения антенны.

Таким образом, рассмотренные выше модели возбуждения содержат переменную шага по времени, которая, исходя из условия сходимости Куранта (4), напрямую влияет на величину ячейки дискретизации. Также эти модели не позволяют гарантировано «попасть» на нужную частоту в спектре после дискретного преобразования Фурье (ДПФ), требуемого для получения комплексных амплитуд векторов поля, что приводит к неточностям интерпретации получаемых результатов.

Предлагается разработанная специально для КРВО модель возбуждения, представляющая собой сложный многочастотный сигнал, подаваемый в область возбуждения антенны. Сигнал формируется согласно выражению:

$$\mathbf{U}(t) = \left( U_0 \sum_{i=1}^{M-1} \sin \left\{ 2\pi \left[ f_{\min} + (i-1) \frac{\Delta\omega}{2\pi} \right] \right\} \right) [t_0 \dots t_{N-1}], \quad (8)$$

где  $U_0$  – амплитуда сигнала;  $M$  – число значимых частотных выборок;  $t$  – элементы вектора времени.

Исходными данными, позволяющими получить искомые комплексные амплитуды (КА) электромагнитного поля (ЭМП), является наличие массива с временными отсчетами в виде дискретных значений пройденного времени процесса (вектора времени) и массива с временными отсчетами составляющей ЭМП (вектора ЭМП).

Для идентификации КА воспользуемся понятием критической частоты Найквиста  $\nu_n$ , известной из теории цифровой связи, которая может быть найдена как [11]

$$\nu_n = \frac{1}{2\Delta t}. \quad (9)$$

Данную частоту целесообразно ввести для определения максимальной частоты полученного после ДПФ спектра КА. Чем меньшее значение имеет временной шаг, тем выше будет данная частота. Поскольку после ДПФ формируется вектор КА, число элементов которого равно числу временных отсчетов  $N$ , необходимо из них взять те, которые соответствуют интересующему нас интервалу частот, при заданном шаге по частоте  $\Delta\omega$ .

Метод КРВО обладает тем ценным свойством, что позволяет получить решение в широкой полосе частот «сразу» после прохождения всего вектора времени. Получаемый спектр тогда лежит в пределах отрезка частотной оси  $[-\nu_n; \nu_n]$ .

Требуется получить вектор КА, каждый элемент которого соответствует строго той частоте, для которой он рассчитывается. Другими словами, необходимо получить рассчитанные КА искомой величины внутри отрезка частотной оси  $[f_{\min}; f_{\max}]$ . Это говорит о том, что целесообразно привязать частоту дискретизации к одной из частот данного отрезка, например минимальной частоте  $f_{\min}$ .

Тогда частота дискретизации  $f_s$  может быть получена:

$$f_s = f_{\min} n, \quad (10)$$

где  $n$  – число выборок дискретизации.

С другой стороны, в соответствии с теоремой Котельникова и выражением (9), критическая частота Найквиста равна:

$$\nu_n = f_s / 2 = f_{\min} n / 2. \quad (11)$$

Таким образом, исходя из минимальной частоты  $f_{\min}$  интересующего интервала, можно рассчитать фиксированный временной шаг:

$$\Delta t = (f_{\min} n)^{-1}. \quad (12)$$

Регулируя число выборок дискретизации в выражении (12) можно зафиксировать минимальную частоту  $f_{\min}$ , а также управлять размером ячейки КРВО ( $dx, dy, dz$ ), например для улучшения аппроксимации конструкции исследуемой антенны (требуется для КС), исходя из модифицированного условия сходимости Куранта (4):

$$dx = c(f_{\min} n)^{-1} \sqrt{3}. \quad (13)$$

Точность получения электрической характеристики антенны теперь четко зависит от числа значимых частотных выборок в получаемом после ДПФ спектре.

Дискретное прямое преобразование Фурье находится в  $N$  узлах частотной равномерной сетки, выбираемых произвольным образом:

$$F(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \exp(-2\pi i k n / N), \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (14)$$

Непрерывная функция времени одной из составляющих ЭМП, например  $E_z(t_n)$ , полученная после прохождения  $N$  временных шагов представляется в дискретной форме в виде вектора с мгновенными амплитудами данной величины, соответствующими определенному номеру временного шага, например:  $[E_z(t_0) \ E_z(t_1) \ \dots \ E_z(t_{N-1})]$ . Общее время  $T$  процесса распространения ЭМВ, моделируемого КРВО, рассчитывается исходя из временного шага  $\Delta t$  и общего числа временных шагов  $N$ :

$$T = \Delta t(N-1). \quad (15)$$

Величина шага по частоте должна быть строго согласована с временным шагом  $\Delta t$  как

$$\Delta\omega = (\Delta t N)^{-1} = \frac{f_{\min} n}{N}. \quad (16)$$

Если не трогать величину временного шага  $\Delta t$ , для получения более подробного спектра КА необходимо увеличить число временных шагов  $N$ , кратно числу выборок дискретизации  $n$ :

$$N = nn_i, \quad (17)$$

где число  $n_i > 1$  должно быть целым положительным, так как  $N$  дробным быть не может по определению.

Выражение (16) переписывается как

$$\Delta\omega = (\Delta t N)^{-1} = \frac{f_{\min}}{n_i} \quad (18)$$

или

$$n_i = \frac{f_{\min}}{\Delta\omega}. \quad (19)$$

Таким образом, применяя формулу (19), можно автоматически получать число временных шагов  $N$ , исходя из заданных минимальной частоты и шага по частоте, либо кратно уменьшать величину шага по частоте  $\Delta\omega$ , увеличивая точность нахождения КА ДПФ также за счет увеличения общего времени  $T$  наблюдаемого процесса.

Разработанная модель возбуждения позволяет автоматически регулировать точность определения комплексных амплитуд составляющих векторов ЭМП, рассчитываемых КРВО, и точность аппроксимации моделируемой геометрии антенны за счет изменения числа пройденных временных шагов  $N$ .

Применение возбуждения (8) обладает неоспоримым преимуществом, по сравнению с обычным нестационарным источником, поскольку позволяет получать необходимые спектральные составляющие КА через задаваемый фиксированный шаг по частоте  $\Delta\omega$  в требуемой полосе частот.

Токи в КРВО находятся через касательные составляющие к некоторой поверхности (провода, например) векторы магнитного поля за счет разностной аппроксимации обхода контура. Она основана на сумме разностей величин составляющих магнитного поля, лежащих в плоскости, перпендикулярной оси провода:

$$I_n(y) = (H_{x1(n_z+1)} - H_{x2(n_z-1)})dz + (H_{z1(n_x+1)} - H_{z2(n_x-1)})dx, \quad (20)$$

где  $n$  – порядковый номер ячейки с электрическими параметрами металла провода вдоль его оси (вдоль  $y$ );  $n_z, n_x$  – номера тех же ячеек вдоль осей  $z$  и  $x$ , соответственно;  $H_{x1, x2, z1, z2}$  – составляющие магнитного поля, касательные к контуру интегрирования.

## Гибридный метод

Составляющие  $H_{x1}, H_{x2}$  и  $H_{z1}, H_{z2}$  в выражении (20) имеют разное направление, но практически равные амплитуды и фазы, поскольку находятся по разные стороны от идеально проводящей поверхности на одинаковых расстояниях. Данный факт позволяет устанавливать их приближенные значения, исходя из известной комплексной амплитуды тока  $I_n$ , выбрав соответствующее направление векторов по касательной к контуру интегрирования, а амплитуды разделив на 4.

Полученные комплексные амплитуды составляющих вектора  $H$  подставляются в алгоритм КРВО в виде «мягких» источников гармонического колебания для соответствующих составляющих поля. Они порождают остальные составляющие электромагнитного поля и запускают процесс распространения электромагнитной волны. Полученная волна дифрагирует на различных вносимых неоднородностях, накапливая изменения ближнего поля излучателя.

Дальнейшее нахождение диаграммы направленности возможно, например путем применения метода Стреттона-Чу [10].

Справедливость предлагаемого подхода оценим на примере численного решения задачи излучения тонкого симметричного вибратора, расположенного в электрической близости от идеально проводящей полуплоскости (экрана), перекрывающей его на 60%.

Симметричный вибратор: длина плеча  $L=0.25$  м, толщина (в МоМ) – 0.001 м, без оболочки в свободном пространстве. Частота 300е6 Гц.

Параметры КРВО: длина плеча 72 ячейки, размер ячейки: 0.0035 м, частота  $f_{\min} = 300$  МГц. Ток задан в виде колец магнитного поля, состоящих из 4 сегментов. Применяется «мягкое» возбуждение. Величина временной дискретности (временного шага  $\Delta t$ ): 6.66·10<sup>-12</sup> с, 3000 временных шагов. После отработки алгоритма выводится временной график и спектр напряжения в области возбуждения (рис. 3).

Соответствующий «приложенному» напряжению спектр тока в зазоре и его временной график также анализируются. Далее рассчитывается, например, величина входного сопротивления. В представленном случае входное сопротивление на частоте 300 МГц равно:  $Z_A = 32,1 + 117,6i$  Ом, что отличается от сопротивления симметричного вибратора в свободном пространстве.

Оценим влияние экрана на результирующее распределение тока вдоль вибратора. Для этого сравним его с током в свободном пространстве (рис. 4).

Необходимо учитывать вклады отраженного поля за счет «мягкого» возбуждения касательными компонентами магнитного поля, полученными из рассчитанного методом моментов распределения тока. «Мягкое» возбуждение дает пропорциональный рост амплитуд токов в зависимости от пройденных временных шагов. Это «вклады» отраженного поля, в том числе и от границ расчетной области с PML. Данные «вклады» растут прак-

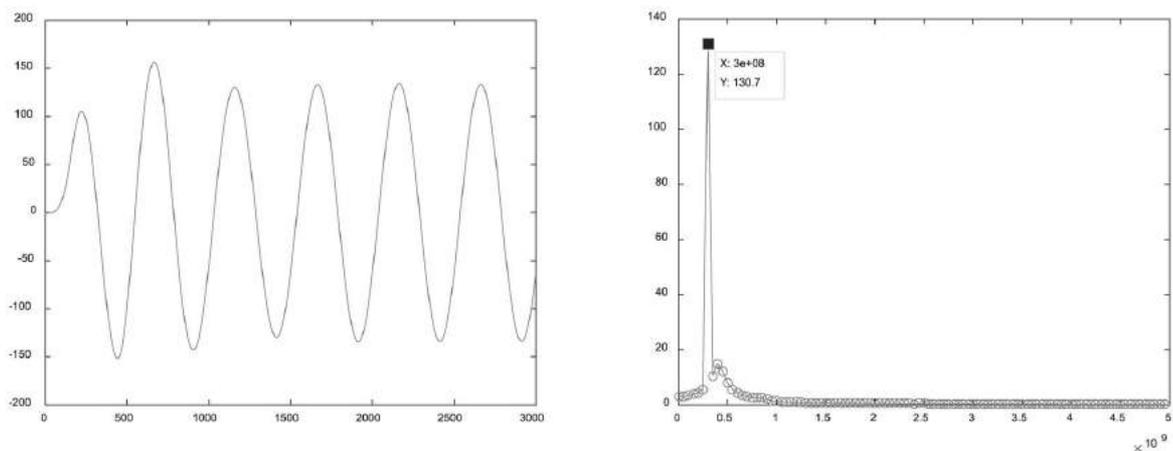


Рис. 3. Временная зависимость и спектр напряжения в области возбуждения гибридной модели симметричного вибратора

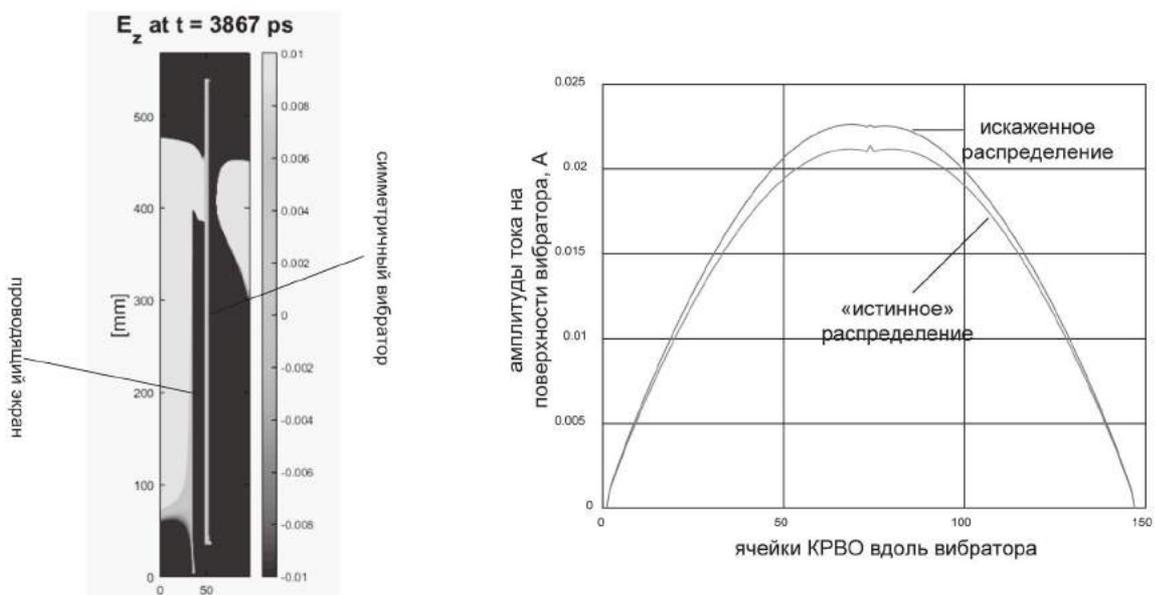


Рис. 4. Дифракционная картина поля симметричного вибратора возле частично перекрывающего его проводящего экрана и распределение тока

тически одинаково по всей длине вибратора, поэтому «истинное» распределение поля в свободном пространстве, полученное ММ, делится на распределение, полученное «мягким» возбуждением КРВО. Вычисляются весовые коэффициенты, показывающие отличия между методами, для каждой точки поверхности вибратора. Ставится препятствие, и полученное распределение тока умножается на весы. Это дает новое распределение тока с учетом отраженных от предметов волн.

Оценим влияние экрана на результирующее распределение тока вдоль вибратора. Для этого сравним его с током в свободном пространстве (рис. 4).

Необходимо учитывать вклады отраженного поля за счет «мягкого» возбуждения касательными компонентами магнитного поля, полученными из рассчитанного методом моментов распределения тока. «Мягкое» возбуждение дает пропорциональный рост амплитуд токов в зависимости от пройденных временных шагов. Это «вклады» отраженного поля, в том числе и от границ расчетной области с РМЛ. Данные «вклады» растут практически одинаково по всей длине вибратора, поэтому «истинное» распределение поля в свободном пространстве, полученное ММ, делится на распределение, полученное «мягким» возбуждением КРВО. Вычисляются весовые коэффициенты, показывающие отличия между методами, для каждой точки поверхности вибратора. Ставится препятствие, и полученное распределение тока умножается на весы. Это дает новое распределение тока с учетом отраженных от предметов волн.

Таким образом, доказано, что влияние окружающих предметов на распределение тока, получаемое ММ-КРВО, имеется. Это позволяет аппроксимировать ток через компоненты магнитного поля предложенным выше способом, получая, например, приближенные зависимости входного сопротивления с учетом влияния неоднородностей. Использование гибридного метода ММ-КРВО допустимо также для исследования дифракционной картины поля, излучаемого конкретной антенной, или построения результирующей диаграммы направленности. Ток на проволочной поверхности должен быть предварительно рассчитан ММ, после чего полученные комплексные амплитуды преобразованы в составляющие магнитного поля в виде сторонних «мягких» источников КРВО.

## Литература

1. Gibson, W. S. The Method of Moments in Electromagnetics / W. S. Gibson. – Chapman & Hall/CRC. 2008.
2. Jin, J. M. Theory and Computation of Electromagnetic Fields / J. M. Jin. – N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2010.
3. Taflove, A. Numerical solution of steady state electromagnetic scattering problems using the time dependent Maxwell's equations / A. Taflove, M. Brodwin // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Aug. 1975. – Vol. MMT-23. – P. 623–630.
4. Richmond, J. Computer Program for Thin-Wire Structures in Homogeneous Conducting Medium / J. Richmond // National

technical Information Service. – July 1973. – Springfield: VA, NASA contractor Rep., CR-2399.

5. Lai Z-H, Kiang J-F, R. Mittra. A Domain Decomposition Finite Difference Time Domain (DD-FDTD) Method for Scattering Problem from Vary Large Rough Surfaces // Antennas and Propagation (ISAP), 2014 International Symposium on. – Dec. 2014.

6. Бородулин П. Ю. Численные методы электродинамики: Моногр. / П. Ю. Бородулин. – СПб.: ВАС, 2016.

7. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. П. Митры; пер. с англ. под ред. Э. Л. Бурштейна. – М., 1977.

8. Berenger, J. P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves / J. P. Berenger // J. Comp. Phys. – 1994. – Vol. 114, no. 2. – Pp. 185–200.

9. Stutzman, W. L. Antenna Theory and Design / W. L. Stutzman, G. A. Thiele. – 3-rd ed. – N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2012.

10. Стреттон, Дж. А. Теория электромагнетизма / Дж. А. Стреттон. – М – Л: ГИТЛ, 1948.

## Моделирование процесса адаптации космического телескопа «Миллиметрон»

### Modeling of the "Millimetron" space telescope alignment

#### Дубрович / Dubrovich V.

Виктор Константинович  
(viktor.dubrovich@scaegroup.com)  
доктор физико-математических наук.  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
и.о. зав. отдела ВЭД.  
г. Санкт-Петербург

#### Заика / Zaika D.

Дмитрий Юрьевич  
(dmitry.zaika@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер-программист.  
г. Санкт-Петербург

#### Качурин / Kachurin V.

Владимир Константинович  
(vladimir.kachurin@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
младший научный сотрудник.  
г. Санкт-Петербург

#### Цема / Tsema G.

Григорий Сергеевич  
(grigoriy.tsema@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер.  
г. Санкт-Петербург

#### Щесняк / Shchesnyak S.

Сергей Степанович  
(sergey.schesnyak@scaegroup.com)  
доктор технических наук, профессор.  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
генеральный директор.  
г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** космический телескоп – space telescope; главное зеркало – primary specula; центральное зеркало – central specula; вторичное зеркало или контррефлектор – secondary specula.

В статье рассмотрена методика адаптации космического телескопа «Миллиметрон», основанная на анализе изображения фокального пятна. Электродинамические расчеты параметров фокального пятна выполнены в приближении физической оптики для видимого диапазона длин волн ( $\lambda = 0,65 \mu\text{м}$ ), что позволило увеличить точность установки элементов космического телескопа.

The article deals with the technique of adapting space telescope "Millimetron", based on the analysis of the image focal spots. Electrodynamic calculation of the parameters of the focal spot is made in the physical optics approximation for visible wavelengths ( $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$ ), which increased accuracy of installation of elements of the space telescope.

Космический телескоп «Миллиметрон» представляет собой двухзеркальный телескоп, выполненный по схеме Кассегрена. Оптическая схема телескопа представлена на рис. 1. Главное зеркало параболическое, диаметром 10 м состоит из центрального зеркала (ЦЗ)

и 72 панелей. Контррефлектор (КР) – гиперболическое зеркало.

Для нормальной работы телескопа необходимо периодически контролировать взаимное расположение его отдельных частей [1–3]. Наиболее простым и надежным методом контроля является амплитудный метод. В работе предлагается метод адаптации телескопа по геометрическим свойствам (см. [4]) фокального пятна, как в первичном, так и во вторичном фокусах.

Предполагается, что перед началом процесса адаптации навигационная аппаратура совмещает ось ЦЗ с направлением на удаленный источник излучения. Сам процесс адаптации проходит в три этапа.

Первый этап: совмещение первичного фокуса КР с фокусом ЦЗ.

Второй этап: совмещение осей ЦЗ и КР.

Третий этап: установка панелей главного зеркала.

**Первый этап.** Для работы в первичном фокусе в вершине КР вырезано отверстие, а в первичном фокусе расположена приемная матрица. От удаленного источника излучение падает на главное зеркало телескопа. Отраженное от главного зеркала излучение частично проходит через отверстие в вершине КР и попадает на приемную матрицу, расположенную в первичном фокусе КР. Излучение, прошедшее через отверстие, регистрируется приемной матрицей, которая жестко

связана с КР и при сдвигах и поворотах последнего тоже меняет свое положение. Центр матрицы совмещен с первичным фокусом КР. В случае совмещения первичного фокуса КР и фокуса ЦЗ фокальное пятно окажется точно в центре приемной матрицы. Двигая КР в направлении перпендикулярном оси ЦЗ, можно вывести фокальное пятно в центр матрицы, находящейся в первичном фокусе. Движением КР вдоль оси ЦЗ можно найти положение КР, при котором достигается абсолютный максимум интенсивности в изображении. Найденное таким образом положение КР соответствует искомому положению с совмещенными фокусами ЦЗ и КР. Ниже (рис. 2) приведены результаты расчетов максимальной плотности потока мощности на приемной матрице от расстояния до фокуса ЦЗ. Расчеты проводились в приближении физической оптики для длины волны  $\lambda = 0,65$  мкм и радиуса отверстия в вершине КР 25 мм. Ось  $OX$  – расстояние до фокуса в мкм, ось  $OY$  – плотность потока энергии в относительных единицах.

Убывание плотности потока энергии на 20% происходит на расстоянии ~ 10 мкм. Эта величина является оценкой точности установки КР вдоль оси ЦЗ. Точность установки в направлении перпендикулярном оси ЦЗ определяется размерами пикселя приемной матрицы.

**Второй этап.** Расчеты фокального пятна в главном фокусе телескопа показали, что поворот КР вокруг оси, проходящей через первичный фокус КР, очень

мало изменяют структуру пятна, а только сдвигают его центр. По величине сдвига определяется наклон КР, и производится его установка. Для установки КР по углу необходимо минимизировать вклад панелей главного зеркала в фокальное пятно. Для этого панели устанавливаются так, чтобы «зайчики» от них не попадали на центральное пятно. Таким образом, для совмещения осей КР и ЦЗ достаточно развести панели так, чтобы они не влияли на центральное пятно, и установить это пятно в центр матрицы.

**Третий этап.** На третьем этапе производится установка панелей. На рис. 3 изображено фокальное пятно перед началом установки панелей. Центральное пятно сформировано ЦЗ. Вокруг него видны более слабые пятна, сформированные панелями главного зеркала. Для установки панели по углу необходимо панель развернуть на небольшой угол и путем вычитания двух изображений до и после поворота выделить «зайчик» от данной панели. Затем по положению «зайчика» на изображении вычисляется поворот, на который необходимо повернуть панель.

На практике оказалось, что образец ЦЗ имеет существенные по сравнению с длиной волны неровности. Ниже кратко представлены результаты исследований опытного образца фрагмента параболического зеркала размером 20×20 см. На образце имеются нерегулярные неровности, которые хорошо видны при облучении образца плоской волной и съемке отраженного света

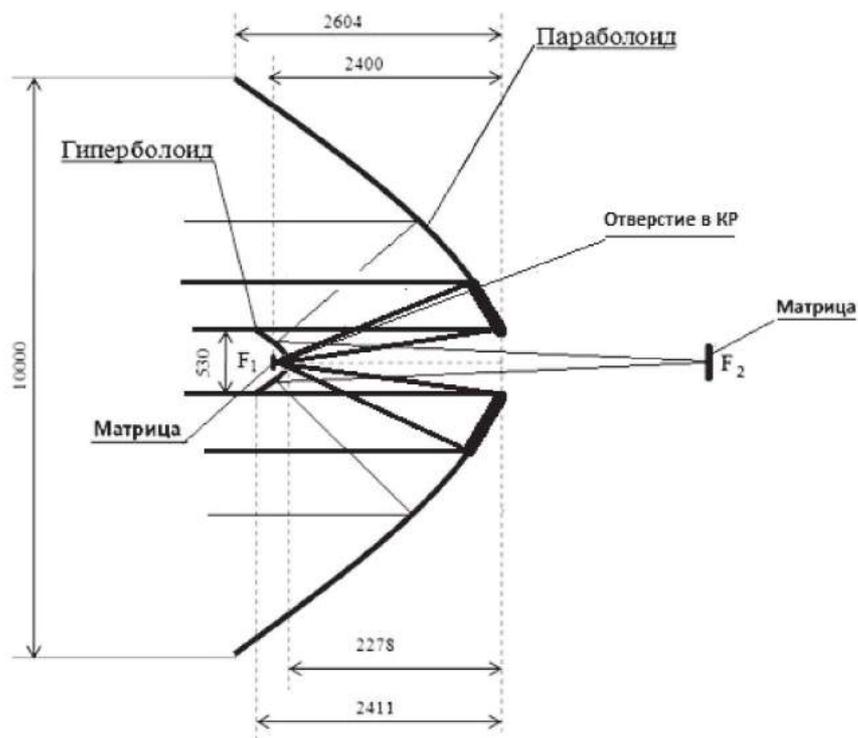


Рис. 1. Оптическая схема телескопа «Миллиметр»

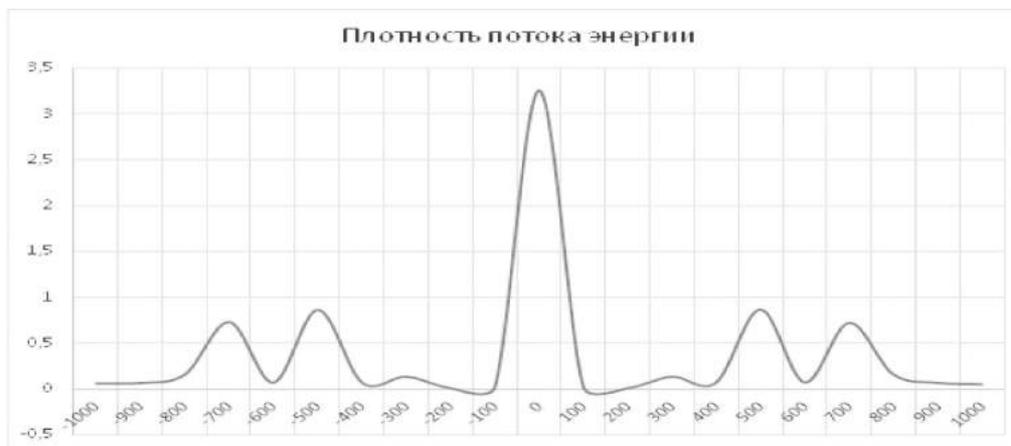


Рис. 2. Зависимость максимума плотности потока энергии от сдвига приемной матрицы

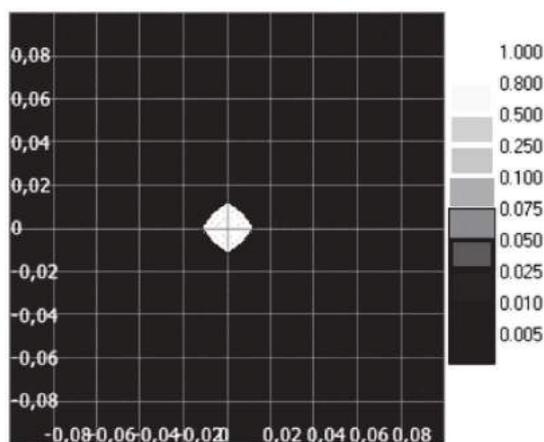


Рис. 3. Дифракционное пятно при больших отклонениях панелей от оптимального положения

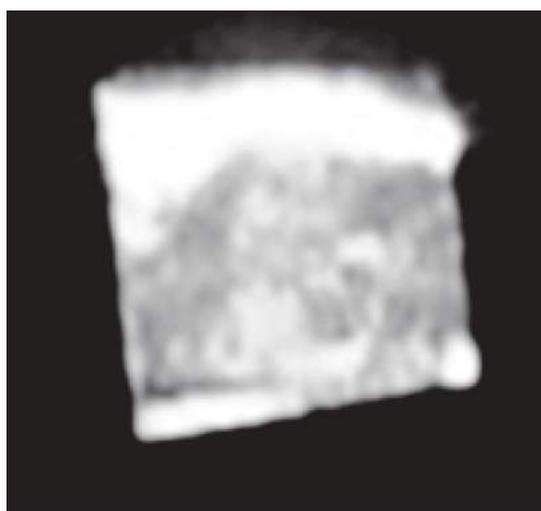


Рис. 4. Нерегулярные неровности образца зеркала



Рис. 5. График разреза фокального пятна

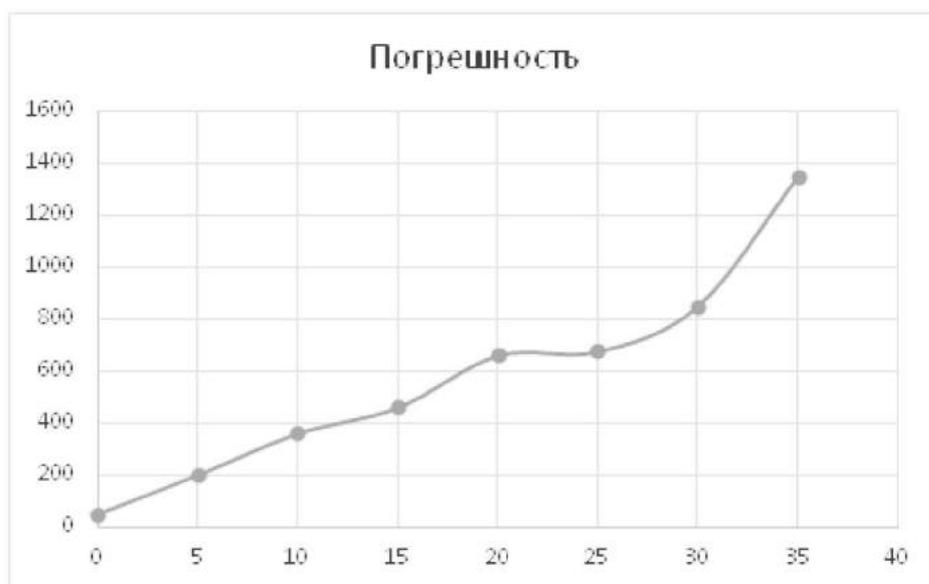


Рис. 6. Погрешность установки КР в зависимости от максимального угла отклонения фацетов.  
 Ось OX – максимальный угол отклонения фацетов в угловых секундах,  
 ось OY оценка погрешности установки КР в мкм

через объектив, установленный в фокальном пятне. Рис. 4 демонстрирует такой снимок.

На рис. 5 представлен график разреза фокального пятна от коллимированного пучка света, сформированного опытным образцом фрагмента зеркала. Длина волны источника 0,65 мкм, размеры панели приблизительно 20×20 см. На графике по оси  $OX$  – расстояние в пикселях, размер пикселя – 4,3 мкм.

Как видно из рис. 5, размеры реального пятна значительно превосходят размеры пятна Эйри, что связано с неровностями зеркала. Для полученного образца фактические отклонения от параболы составляют ~ 15–20 мкм.

Рассмотрена фасеточная модель зеркала, то есть каждая панель, и ЦЗ считается состоящими из отдельных кусков параболоида, но ориентированных случайным образом в некотором конусе углов поворота. Продольный масштаб фасетов и максимальный угол их отклонения являются свободными параметрами задачи.

В случае фасеточной модели на первом этапе установка КР вдоль оси ЦЗ производится по критерию минимальной ширины пучка [5]. На рис. 6 изображен график погрешности установки КР вдоль оси ЦЗ от максимального угла отклонения фасетов. Ось  $OX$  – максимальный угол отклонения фасетов, ось  $OY$  оценка погрешности установки КР.

Второй этап остается без изменений.

Для модификации третьего этапа установки с учетом неровностей главного зеркала была разработана компьютерная программа расчета электромагнитного поля в окрестности главного фокуса телескопа. В модели на ЦЗ и на каждой панели задается массив фасетов со случайными координатами, случайным углом отклонения нормали фасета от нормали к идеальному параболоиду и случайной площадью. Количество фасетов на каждом элементе главного зеркала определяется площадью этого элемента и средним размером фасета. Обозначим значения, снимаемые с приемной матрицы  $B_{cr}$ , где  $c$  – номер столбца,  $r$  – номер строки. В качестве характеристик изображения рассматриваются моменты изображения:

$$\langle B \rangle = \sum_{c,r} B_{cr}$$

$$X = \sum_{c,r} \frac{cB_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$Y = \sum_{c,r} \frac{rB_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$XX = \sum_{c,r} \frac{c^2 B_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$XY = \sum_{c,r} \frac{crB_{cr}}{\langle B \rangle}$$

$$YY = \sum_{c,r} \frac{r^2 B_{cr}}{\langle B \rangle}$$

Нулевой момент  $\langle B \rangle$  является нормировочным множителем и пропорционален энергии излучения, падающего на приемную матрицу.  $X$  и  $Y$  имеют смысл координат центра пятна,  $XX$  и  $YY$  определяют эффективный размер пятна по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

Наряду с моментами изображения рассматриваются моменты разности изображений. Разности изображений соответствует массив чисел, определенный как

$$D_{cr} = B_{cr}^{(1)} - B_{cr}^{(2)},$$

где  $B_{cr}^{(1)}$  и  $B_{cr}^{(2)}$  – два изображения.

Массив разности изображений удобно разбить на отрицательную и положительную части  $D^+$  и  $D^-$ :

$$D_{cr}^+ = D_{cr} \text{ при } D_{cr} > 0;$$

$$D_{cr}^- = -D_{cr} \text{ при } D_{cr} < 0.$$

Для отрицательной и положительной частей определяются моменты так же, как для изображения. При движении панели характеристики разности изображений качественно повторяет динамику характеристик пятна, сформированного одной движущейся панели.

## Заключение

В статье рассмотрена оригинальная методика адаптации отражателей телескопа "Миллиметр", которая позволяет производить юстировку элементов антенны по свойствам пятен как в первичном, так и во вторичном фокусах, используя излучение удаленной звезды в оптическом диапазоне. Проведено обоснование метода установки панелей по разности изображений. Проведенные вычисления позволяют применять разность изображений для адаптации положения панелей. Показано, что излучение удаленной звезды в оптическом диапазоне может быть использовано для достаточно точной юстировки элементов радиотелескопа.

## Литература

1. Noethe, L. Active optics in modern large optical telescopes / L. Noethe // Progress in optics. – 2002. – Vol. 43. – P. 1–70.
2. The Giant Magellan Telescope active optics system / B. McLeod [et al.] // Mirror (FSM). – 2014. – Vol. 4. – P. 5.
3. Mirror actively deformed and regulated for applications in space: design and performance / M. Laslandes [et al.] // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52, No. 9. – P. 091803.
4. Teague, M. R. Image analysis via the general theory of moments / M.R. Teague // JOSA. – 1980. – Vol. 70, No. 8. – P. 920–930.
5. Тараненко, В. Г. Адаптивная оптика / В.Г. Тараненко, О.И. Шанин. – М.: Радио и связь, 1990. – 112 с.

**Способы повышения эффективности бортовых средств радиомониторинга наземных источников радиоизлучения за счет применения антенных решеток**

**Methods of increase in efficiency of onboard equipment of radio monitoring of a radio emission land-based sources due to the antenna arrays using**

**Кузнецов / Kuznetsov A.**

Александр Семенович  
(a.kuznetsov@scaegroup.com)  
кандидат технических наук, доцент.  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
главный конструктор радиоэлектронных средств.  
г. Санкт-Петербург

**Славянский / Slavyanskiy O.**

Олег Евгеньевич  
(o.slavyanskiy@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
начальник отдела обработки сигналов.  
г. Санкт-Петербург

**Хабиров / Khabirov D.**

Денис Олегович  
(d.khabirov@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
заместитель начальника отдела антенно-фидерных устройств.  
г. Санкт-Петербург

**Бокучава / Bokuchava P.**

Петр Нугзариевич  
(p.bokuchava@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер-конструктор 1-й категории отдела комплексных средств.  
г. Санкт-Петербург

**Гладуш / Gladush A.**

Андрей Игоревич  
(andrei.gladush@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
инженер-программист отдела обработки сигналов.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: радиопеленгатор – radio direction finder; антенная решетка – antenna array; суммирование косинусоид – the cosine wave sum.

Предложены два способа повышения эффективности космического фазового радиопеленгатора: за счет применения линейных антенных решеток в качестве антенных элементов пеленгатора, а также за счет использования кольцевых антенных решеток. Рассмотрен вопрос обработки сигналов с учетом вида сигнала.

Two methods of satellite phase direction-finder efficiency increasing have been suggested: by using of line antenna array as direction-finder antenna elements, and by applying of ring antenna arrays. Signal processing task has been analyzed taking into account the type of signal.

**Постановка задачи**

В целях обозначения мест аварий и крушений самолетов, вертолетов, морских судов широко используются радиомаяки, сигналы от которых фиксируются космическими системами радиомониторинга типа КОСПАС-САРСАТ. Однако не всегда радиомаяки срабатывают штатно, например после аварии могут оказаться на большой глубине или под фрагментами объекта, экранирующими излучение радиомаяка.

При анализе развития ситуации, приведшей к аварии, либо при поиске исчезнувшего воздушного судна определенный интерес представляет информация о траектории движения объекта. Большинство подвижных объектов оборудовано всевозможными радиоэлектронными средствами (РЭС): радиолокаторами кругового обзора, системами спутниковой связи и т.д., поэтому

сигналы данных РЭС могут быть использованы для отслеживания траектории движения объекта.

Антенны упомянутых РЭС зачастую не предназначены для излучения в верхнюю полусферу. В связи с этим при размещении средств радиомониторинга на борту космического аппарата (КА) обнаруживать сигналы от РЭС необходимо по боковым лепесткам диаграмм направленности антенн, уровень сигнала в которых на 15–20 дБ ниже, чем в основном лепестке антенны РЭС. Кроме того, сигналы РЭС имеют специфическую форму, затрудняющую задачу их обнаружению и пеленгации.

В этой ситуации актуальной становится задача повышения чувствительности радиопеленгатора на борту КА. Так как возможности повышения чувствительности близки к достижимому пределу, то чувствительность радиопеленгатора может быть увеличена путем использования более направленных антенн, а также путем учета особенностей радиосигналов пеленгуемых РЭС.

### Повышение чувствительности радиопеленгатора за счет применения антенных решеток

Одной из основных трудностей при построении антенных систем бортовых фазовых радиопеленгаторов является противоречивое требование обеспечения величины ширины диаграммы направленности по уровню минус 3 дБ (обычно  $\approx 60^\circ$ ) и величины коэффициента усиления (требования достигают 15...25 дБ). Действительно, не существует способа реализовать какую-либо антенну, которая могла бы одновременно в полной мере удовлетворять данным двум требованиям, т.к. эти две величины находятся в тесной взаимосвязи между собой.

В связи с этим необходимы реализации антенных систем, обеспечивающую выполнение указанных требований косвенными методами. Данные методы могут быть реализованы путем выбора определенного типа антенны с соответствующей диаграммообразующей схемой (ДОС).

Оптимальным, с точки зрения максимизации вероятности обнаружения сигнала РЭС в заданном секторе обзора, является вариант использования цифровых многоканальных антенных решеток, каждый канал которых содержит радиоприемник и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Выигрыш в чувствительности пеленгатора (по полю) при этом пропорционален количеству антенных элементов решетки и для приемлемых на практике размеров решетки может достигать 11–14 дБ.

Платой за улучшение чувствительности является существенное усложнение и удорожание пеленгатора. Например, переход от одиночных антенных элементов к антенным решеткам (АР)  $4 \times 4$  в 8-элементном фазовом пеленгаторе потребует использования 128 приемных каналов с АЦП (вместо 8 каналов в пеленгаторе без антенных решеток).

Упростить схему пеленгатора можно, используя антенную решетку с электронным сканированием. В каждом канале устанавливается управляемый фазовращатель. Выигрыш по чувствительности пеленгатора по полю, как и в предыдущем случае, может достигать 11–14 дБ. Упрощенная схема такого радиопеленгатора показана на рис. 1.

Недостатком данной схемы является снижение вероятности обнаружения сигнала РЭС за счет последовательного перемещения луча в заданном секторе поиска.

Предлагается вариант использования специальным образом расположенных линейных синфазных антенных решеток для повышения чувствительности многобазового фазового пеленгатора. Схема пеленгатора отличается простотой в реализации и обеспечивает выигрыш в чувствительности до 7–9 дБ.

Такой результат достигается за счет применения в системе радиомониторинга, расположенной на борту КА, фазового радиопеленгатора с двумя ортогонально расположенными линейками антенн. При этом вместо одиночных антенных элементов (АЭ), характеризующимися диаграммой направленности с шириной  $\approx 60^\circ \times 60^\circ$  и коэффициентом усиления (КУ) 7–9 дБ, используются линейные антенные решетки  $1 \times 8$  элементов.

Переход от слабонаправленных одиночных АЭ к линейным АР (рис. 2), ширина ДН которых составляет  $\approx 8^\circ \times 60^\circ$ , (возможно также применение АР  $1 \times 4$  либо  $1 \times 2$  элементов) позволяет добиться повышения коэффициента усиления с 7–9 дБ до 15–17 дБ (за счет снижения времени обзора области пространства на Земле, что в случае непрерывно работающего РЭС не является существенным недостатком).

Бортовой вычислительный комплекс (БВК) производит измерение и обработку данных о разностях фаз сигналов, принятых одновременно всеми АР в одной линейке антенн. Дальнейшие вычисления, основанные, например, на методе суммирования косинусов [1], позволяют получить информацию о пеленге на интересующий объект-источник радиоизлучения. Обработка данных от ортогонально расположенных линеек антенн происходит независимо, что в итоге дает информацию о пеленге в двумерном пространстве углов.

### Построение антенной системы радиопеленгатора с использованием кольцевых антенных решеток

Помимо применения в бортовых фазовых радиопеленгаторах антенных систем в виде двух ортогонально расположенных линеек антенн, возможно также применение антенных систем других видов. Предлагается вариант использования кольцевых антенных решеток.

Измерение и обработка данных о разностях фаз сигналов, принятых АЭ, производится одновременно со всех антенных элементов. Таким образом, процедура вычисления пеленга позволяет сразу получить информацию о направлении на ИРИ в двумерном простран-

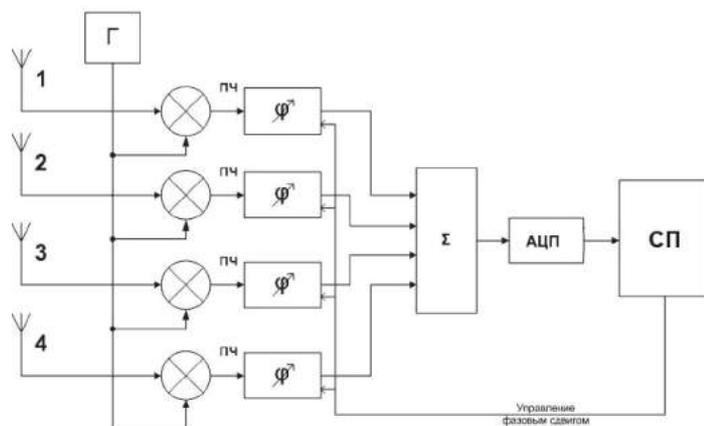


Рис. 1. Схема радиопеленгатора с электронным сканированием

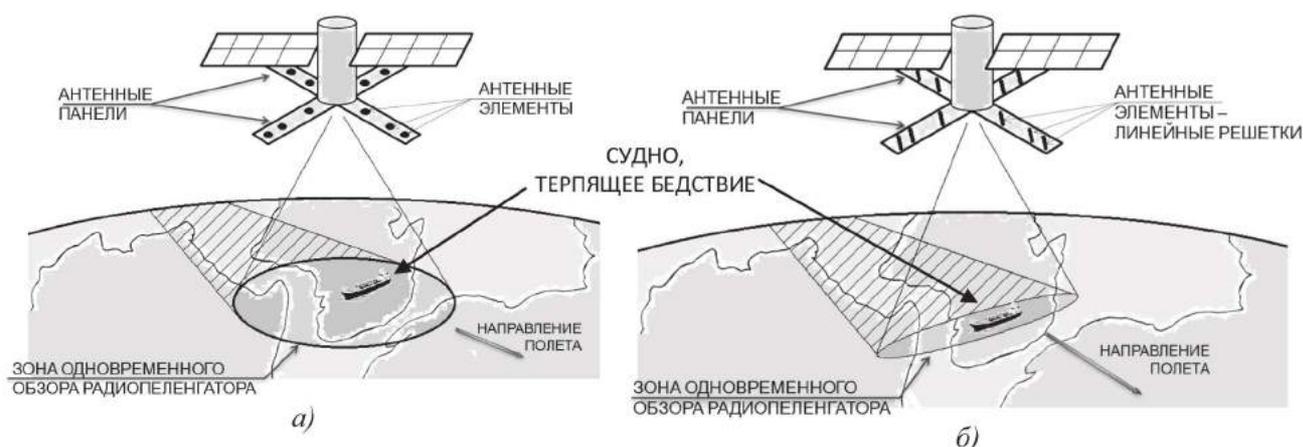


Рис. 2. Бортовой фазовый радиопеленгатор: а) классический вариант; б) предлагаемый вариант

стве углов. Важно отметить, что применение кольцевых антенных решеток взамен двух ортогональных линеек антенн позволяет в целом сократить количество АЭ в антенной системе радиопеленгатора.

Алгоритм работы пеленгатора с антенной системой в виде кольцевой антенной решетки с  $N$  АЭ, основанный на методе суммирования косинусов [2], сводится к следующему. На основе разностей фаз, измеренных во всех парах (фазометрических шкалах) смежных АЭ, вычисляются функции-косинусоиды, определенные в сферической системе координат:

Алгоритм работы пеленгатора с антенной системой в виде кольцевой антенной решетки с  $N$  АЭ, основанный на методе суммирования косинусов [2], сводится к следующему. На основе разностей фаз, измеренных во всех парах (фазометрических шкалах) смежных АЭ, вычисляются функции-косинусоиды  $F_i(\theta, \varphi)$  определенные в сферической системе координат:

$$F_i(\theta, \varphi) = \cos(2\pi n_i \cdot \cos(X(\theta, \varphi) \cdot \cos \alpha_i + Y(\theta, \varphi) \cdot \sin \alpha_i) - \Delta \phi_i),$$

где:  $i$  – номер фазометрической шкалы по порядку,  $i = 1 \dots N$ ;  
 $n_i$  – масштабные коэффициенты шкал ( $n_i = L_i / \lambda$ );  
 $L_i$  – длины шкал;  
 $\alpha_i$  – углы между направлениями шкал и направлением начала отсчета азимута;  
 $\Delta \phi_i$  – величины разностей фаз, измеренные на соседних шкалах;

$$X(\theta, \varphi) = \sin \theta \cdot \cos \varphi; \quad Y(\theta, \varphi) = \sin \theta \cdot \sin \varphi.$$

Затем производится алгебраическое суммирование всех полученных функций-косинусов. Искомый пеленг (значения углов  $\theta, \varphi$ ) на ИРИ вычисляется как аргумент функции-суммы косинусов в точке, в которой данная функция принимает наибольшее значение:

$$[\theta, \varphi] = \arg \max \left( \sum_{i=1}^N F_i(\theta, \varphi) \right).$$

На рис. 3 представлена иллюстрация принципа вычисления пеленга ( $\theta, \varphi$ ) в пеленгаторе с антенной

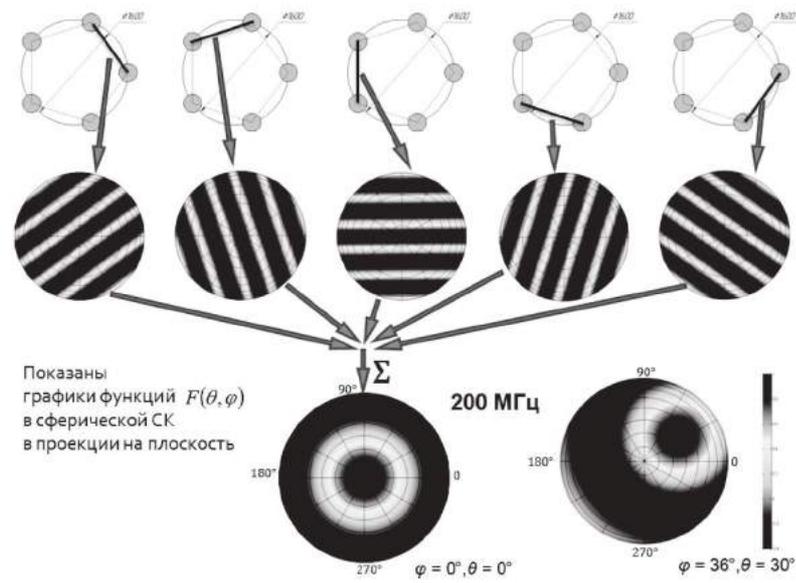


Рис. 3. Иллюстрация принципа вычисления пеленга

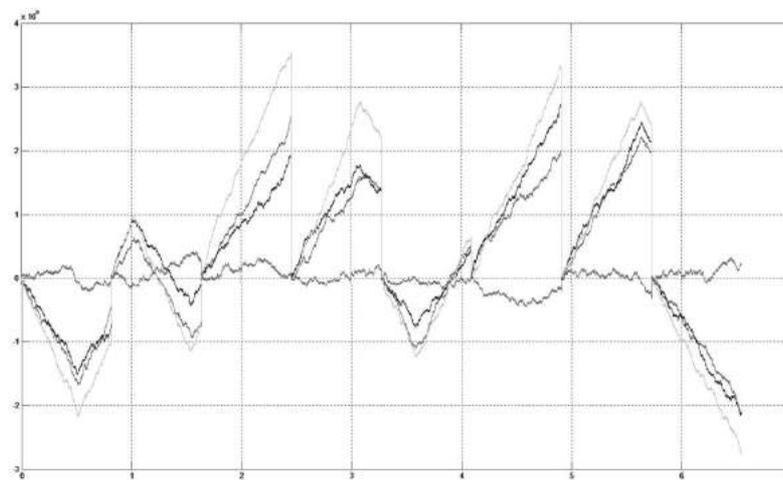


Рис. 4. Свертки сигналов в каналах приема и опорного сигнала.  
(По оси X – номер отсчета, по оси Y – свертка).  
Уровень сигнал/шум = -20 дБ

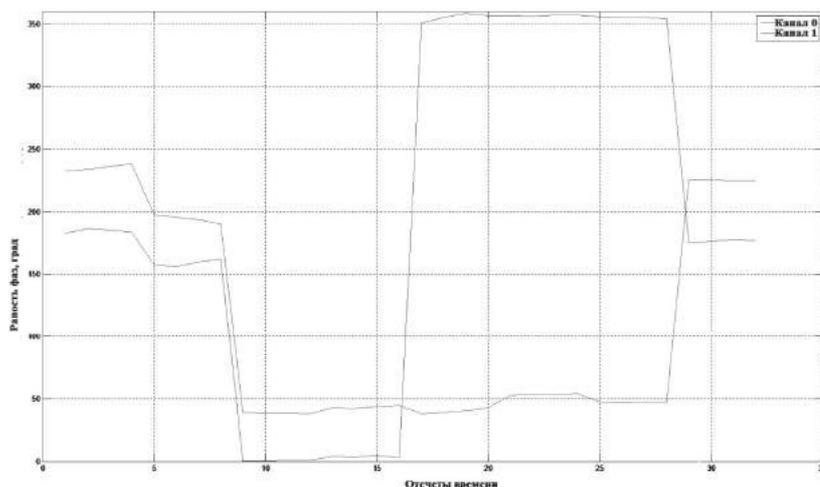


Рис. 5. Текущие разности фаз между сигналами в каналах приема и опорным сигналом.  
Уровень сигнал/шум = -20дБ

системой в виде кольцевой антенной решетки. В качестве примера приведены графики результата вычисления пеленга для  $(\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ)$  и для  $(\theta = 36^\circ, \varphi = 30^\circ)$  на частоте 200 МГц. Диаметр кольцевой антенной решетки 1600 мм. Результаты получены путем математического моделирования.

Посредством правильного выбора диаметра окружности, по которой расположены АЭ, и количества АЭ, можно добиться соответствия характеристик радиопеленгатора следующим требованиям:

- точность определения пеленга (возрастает при увеличении диаметра АР);
- вероятность аномальных ошибок вследствие неоднозначности фазовых измерений (снижается при увеличении количества антенных элементов).

### Обработка сигналов пеленгатора с учетом вида радиосигнала

Проведенное математическое моделирование и экспериментальная апробация алгоритмов показали, что определенного выигрыша в вероятности обнаружения сигнала и точности вычисления разности фаз можно добиться, если есть априорная информация о виде сигнала РЭС.

В случае если известно, что в данном диапазоне работают средства радиосвязи с квазинепрерывными сигналами, наиболее подходящим является алгоритм обработки на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ).

IP-ядро БПФ настраивается на режим конвейерной обработки данных, и выдает значение рассчитанных действительной и мнимой части числа, соответствующих составляющей амплитуды сигнала.

Посредством синхронного детектирования на выделенных частотах (перевод на нулевую частоту) определяются фаза в каждом канале, средняя мощность, тип манипуляции, параметры посылки.

По каждому выявленному сигналу выполняются следующие операции:

С помощью специального ядра ПЛИС формируется матрица значений синусов и косинусов сигнала на выбранной частоте. Производится вычисление свертки входных сигналов по каждому каналу АЦП с синхронными значениями синуса и косинуса (рис. 4). Определяются синус и косинус фазы каждого сигнала по графику свертки относительно сгенерированного опорного сигнала.

Вычисленные фазы для всех приемников используются для вычисления разности фаз, необходимых для расчета пеленга на источник радиоизлучения.

Для коротких сигналов использование аппарата БПФ для вычисления центральной частоты сигнала при сильных шумах (отношение сигнал/ шум ниже 0 дБ) не представляется возможным.

В этом случае для определения разности фаз предлагается использовать метод межканальной свертки. При этом малая длительность импульсов является основанием для базовой гипотезы о том, что на данном интервале наблюдается только один сигнал.

При свертке сигналов выполняются следующие операции:

$$S_1 \cdot S_2 = A \sin(\omega t) A \sin(\omega t + \varphi) = \frac{A^2}{2} (\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi))$$

Для того, чтобы убрать амплитуду из формулы производится свертка сигнала в любом канале самой с собой ( $S_1 \cdot S_2$ ), которая дает  $A^2/2$ .

Для получения итогового значения разности фаз между каналами необходимо взять арккосинус от накопленных значений свертки.

На рис. 6 приведены СКО вычисления разности фаз в зависимости от отношения сигнал/шум (от -5дБ до

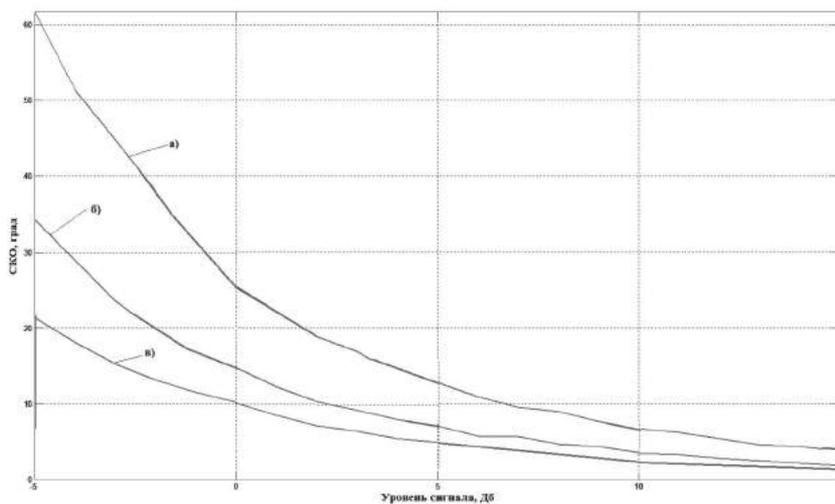


Рис. 6. Результаты расчетов СКО разностей фаз в зависимости от уровня сигнал/шум. Количество отсчетов а) 12, б) 32, в) 64

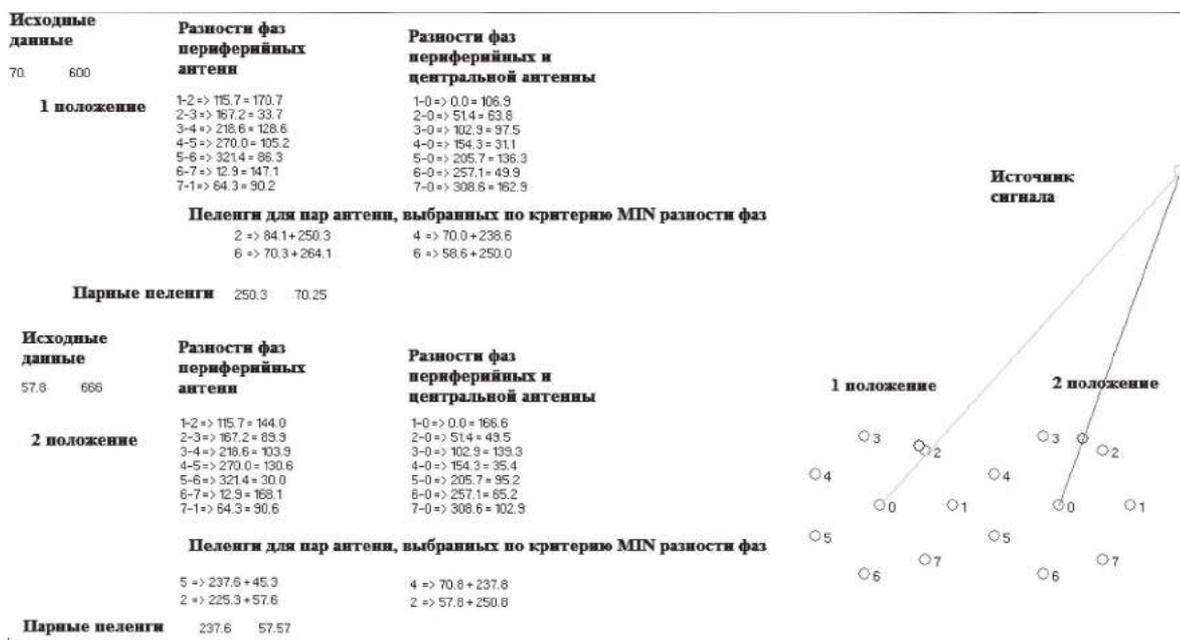


Рис. 7. Пеленгация источника импульсов с учетом движения фазового пеленгатора

+15 Дб) для разного числа отсчетов импульса. Получены методом Монте-Карло по 1000 экспериментов.

Аркакосинус не является однозначной величиной, поэтому для решения неоднозначности используется движение аппарата. Вычисляются пары для двух положений фазового пеленгатора. Выбираются пеленги, дающие точку пересечения в предметной плоскости (рис. 7).

### **Заключение**

Предложены способы повышения эффективности космического фазового радиопеленгатора, используемого в качестве бортового средства радиомониторинга наземных ИРИ: за счет применения линейных антенных решеток в качестве антенных элементов пеленгатора, а также за счет использования кольцевых антенных решеток и учета вида радиосигнала.

Применение линейных синфазных антенных решеток в качестве антенных элементов фазового радиопеленгатора позволяет повысить коэффициент усиления при приеме сигналов РЭС, не сузив при этом полосу обзора на Земле.

Применение кольцевых антенных решеток взамен традиционной конфигурации в виде двух ортогональных линеек антенн позволяет в целом сократить количество АЭ в антенной системе радиопеленгатора.

В статье рассмотрен вопрос обработки сигналов с учетом вида сигнала.

### **Литература**

1. Денисов, В. П. Фазовые радиопеленгаторы: Монография / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 416 с.

2. Белов, В. И. Теория фазовых измерительных систем: монография / В.И. Белов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 148 с.

## Условия обнаружения сигнала в разностном канале при амплитудной пеленгации

### Signal detection conditions in the differential channel in case of amplitude modulation

**Бараник / Baranik Y.**

Юрий Николаевич

(yury.baranik@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики», инженер-программист.

г. Санкт-Петербург

**Лукьянов / Lukyanov S.**

Сергей Геннадьевич

(s.lukjanov@scaegroup.com)

кандидат технических наук, доцент.

АО «Научный центр прикладной электродинамики», начальник отдела.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** амплитудная пеленгация – amplitude modulation; суммарный и разностный каналы – summing and differential channels; выигрыш в отношении сигнал/помеха – gain in signal-to-noise ratio.

В статье рассмотрены условия получения выигрыша в отношении сигнал/помеха в разностном канале по сравнению с суммарным при обнаружении полезного сигнала на фоне внешней помехи, действующей по основному лепестку диаграммы направленности.

The article considers the conditions for obtaining a gain in the signal-to-interference ratio in the difference channel are compared with the summing channel when a useful signal is detected against the background of external interference acting along the main lobe of the radiation pattern.

#### Введение

При работе радиолокационных станций (РЛС), предназначенных для обнаружения и сопровождения как своих, так и неизвестных воздушных и космических объектов, а также при работе в позиционных районах комплексов радиомониторинга и пеленгации, возможна ситуация, когда обнаружение полезного сигнала осуществляется на фоне внешних мешающих сигналов (помех), ухудшающих условия обнаружения. Это могут быть сигналы от расположенных в данном позиционном районе различных радиотехнических средств (РТС), которые при одновременной работе с РЛС воздействуют по боковым и задним лепесткам диаграммы направленности (ДН) антенны РЛС (пеленгатора). Это могут быть собственные сигналы РЛС, переотраженные от рельефной подстилающей поверхности, при работе по низколетящим объектам. Либо это сигналы от посторонних РТС, находящихся на значительном удалении от позиционного района. В последнем случае, при работе РЛС и комплексов радиомониторинга в обзорном по пространству режиме, эти мешающие сигналы в определенные временные интервалы могут приниматься

наряду с полезным сигналом по главному лепестку ДН антенны. Существует целый ряд технических способов повышения помехозащищенности, реализованных в современных РЛС, таких, например, как создание «нулей» ДН антенн, представляющих собой адаптивные фазированные антенные решетки, в направлении на источник мешающего сигнала [1, 2, 5].

Для более простых РЛС (в которых нет сложных систем управления формой луча в главном лепестке ДН антенны) и для комплексов радиомониторинга, предназначенных для обнаружения всех сигналов – и полезных, и помеховых, которые используют амплитудный метод пеленгации, можно получить условия, способствующие увеличению отношения сигнал/помеха.

#### Условия обнаружения сигнала в разностном канале

Рассмотрим для примера амплитудную суммарно-разностную моноимпульсную РЛС, каждый приемный канал которой построен на основе согласованного фильтра (СФ), что в отличие от корреляционной обработки, использующей временное стробирование опорным сигналом, позволяет устранить многоканальность по дальности. Будем полагать, что СФ обеспечивает оптимальный прием поступающих на вход РЛС отраженных сигналов  $s(t) = \text{Re}\{A \exp j(\omega t + \varphi_0)\}$  длительностью  $T$  со случайными амплитудой  $A$  и начальной фазой  $\varphi_0$  на фоне собственных шумов приемника РЛС  $n_0(t)$ .

Для наглядности и простоты изложения (без изменения сути) ограничимся рассмотрением плоскостной задачи.

Примем, что для реализации амплитудного моноимпульсного метода обнаружения (пеленгации, сопровождения) подвижной цели в антенной системе РЛС формируется в рассматриваемой азимутальной (или так же, как и в ортогональной – угломестной) плоскости диаграмма направленности из двух перекрещивающихся лучей, разнесенных на углы  $\pm \theta_0$  относительно равносигнального направления (РСН) [1].

Выразим коэффициенты передачи по напряжению для этих лучей как

$$K_1 = G_0 F(\theta + \theta_0), \quad K_2 = G_0 F(\theta - \theta_0),$$

где  $G_0$  – коэффициент усиления по напряжению каждого луча в направлении его максимума,  $F(\theta)$  – нормированная ДН каждого луча,  $\theta$  – угловое направление, отсчитываемое от РСН.

Обозначим угловые отклонения направлений на источники полезного и мешающего сигналов от РСН (при выставлении ДН в направлении обнаруживаемого объекта) через  $\theta_c$  и  $\theta_n$  соответственно. Считаем, что источники полезного и мешающего сигналов не разрешаются по угловым координатам.

Тогда сигналы на входе приемных каналов после прохождения цепей, обеспечивающих суммарно-разностную обработку, можно записать в следующем виде

$$y(t) = s_{\text{вх}}(t) + n_{\text{вх}}(t) + n_o(t), \quad (1)$$

где

$$S_{\text{вх}}(t) = \begin{cases} AG_0 F_{\Sigma}(\theta_c) \cos(\omega t + \varphi_o) & \text{– для суммарного канала} \\ AG_0 F_{\Delta}(\theta_c) \cos(\omega t + \varphi_o) & \text{– для разностного канала} \end{cases}$$

полезный сигнал на входе соответствующего канала;

$$F_{\Sigma}(\theta) = F(\theta + \theta_o) + F(\theta - \theta_o), \\ F_{\Delta}(\theta) = F(\theta - \theta_o) - F(\theta + \theta_o)$$

суммарная и разностная ДН антенны РЛС;

$$n_{\text{вх}}(t) = \begin{cases} G_0 F_{\Sigma}(\theta_n) n_o(t) & \text{– для суммарного канала;} \\ G_0 F_{\Delta}(\theta_n) n_o(t) & \text{– для разностного канала} \end{cases}$$

мешающий сигнал на входе соответствующего приемного канала РЛС;

$n_o(t)$  – внешний мешающий сигнал на входе антенны РЛС.

При малых угловых отклонениях от РСН (в пределах линейной части пеленгационной характеристики) суммарную и разностную нормированные ДН можно представить в виде [1]

$$F_{\Sigma}(\theta) = 2F(\theta_o), \quad F_{\Delta}(\theta) = 2\mu F(\theta_o) \theta, \quad (2)$$

где  $\mu$  – крутизна пеленгационной характеристики.

Внутренний шум приемника  $n_o(t)$  при рассмотрении задачи оптимального обнаружения представляют в виде белого гауссовского шума с равномерной спектральной плотностью в пределах полосы пропускания. Будем рассматривать внешние помехи, не коррелированные с полезным сигналом, то есть не являющиеся переотраженным от подстилающей поверхности собственным сигналом РЛС (или сигналами собственных РТС позиционного района, переотраженными от местности, в случае рассмотрения работы пеленгатора). Строго говоря,

только при таком условии входную смесь сигналов можно записать в виде (1). Не нарушая общности рассуждений, представим внешний мешающий сигнал в виде некоррелированной шумовой помехи с равномерной спектральной плотностью  $N_{\Pi}$  на входе антенны РЛС в пределах полосы пропускания приемника. Таким образом, мы окажемся в рамках классической задачи по обнаружению полезного сигнала  $s(t)$  со случайными амплитудой и начальной фазой на фоне белого шума с суммарной спектральной плотностью

$$N_{\text{ш}} = N_o + N_{\Pi} G_0^2 F_x^2(\theta_n),$$

где  $N_o$  – спектральная плотность внутреннего шума РЛС, пересчитанная ко входу приемника,

$$F_x(\theta) = \begin{cases} F_{\Sigma}(\theta) & \text{– для суммарного канала} \\ F_{\Delta}(\theta) & \text{– для разностного канала} \end{cases}$$

Так как мы приняли, что оптимальная обработка осуществляется СФ, то в этом случае сигнал на выходе каждого приемного канала определяется выражением [2–4]

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^t h_{\text{опт}}(t-\tau) y(\tau) d\tau,$$

где  $h_{\text{опт}}(t)$  – импульсная характеристика согласованного фильтра, определяемая формой опорного сигнала РЛС.

Тогда отношение сигнал/шум по мощности на выходе СФ определяется выражением [3]

$$q^2 = A^2 \int_0^t |V(t)|^2 dt / N_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где  $V(t)$  – огибающая полезного сигнала на входе СФ.

В рассматриваемом случае из (3), с учетом (1) и (2), получим выражения для отношений сигнал/шум на выходах линейных частей суммарного и разностного каналов:

$$q_{\Sigma}^2 = 4A^2 G_0^2 F^2(\theta_o) T / [N_o + 4G_0^2 F^2(\theta_o) N_n], \quad (4)$$

$$q_{\Delta}^2 = 4A^2 G_0^2 \mu^2 F^2(\theta_o) \theta_c^2 T / [N_o + 4G_0^2 \mu^2 F^2(\theta_o) \theta_n^2 N_n]. \quad (5)$$

Для получения условий, при которых наступает выигрыш в отношении сигнал/шум в разностном канале по сравнению с суммарным, и для количественной оценки этого выигрыша найдем отношение  $\Lambda = q_{\Delta}^2 / q_{\Sigma}^2$ .

Подставив (4) и (5), получим

$$\Lambda = \mu^2 \theta_c^2 [N_o + 4G_0^2 F^2(\theta_o) N_n] / [N_o + 4G_0^2 \mu^2 F^2(\theta_o) \theta_n^2 N_n]. \quad (6)$$

Выигрыш будет иметь место, когда  $\Lambda > 1$ , и из (6) следует, что это наступит, когда будет выполняться неравенство

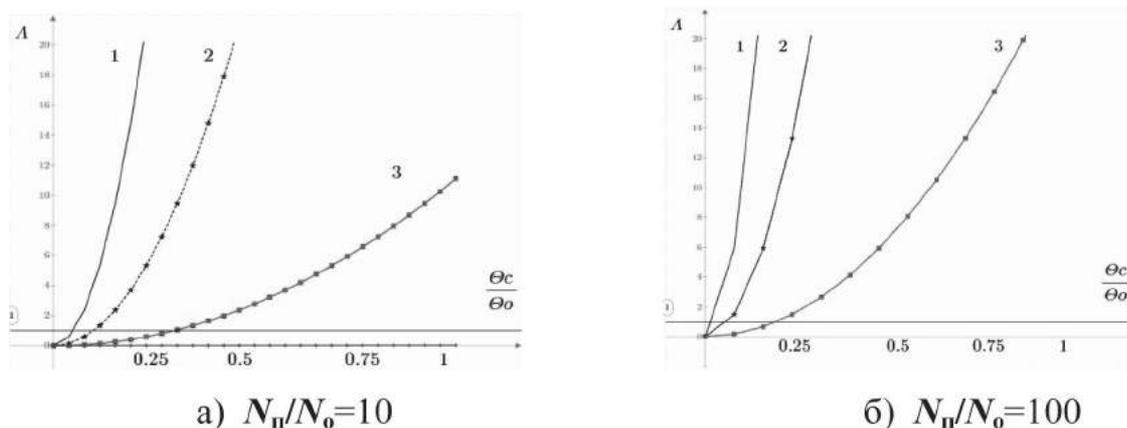


Рис.1. Выигрыш в отношении сигнал/помеха в разностном канале

$$N_o / N_n < 4G_0^2 F^2(\theta_o) (\theta_c^2 - \theta_n^2) / (1 - \mu^2 \theta_c^2). \quad (7)$$

Если рассматриваемая РЛС является РЛС непрерывного сопровождения, то при действии полезного сигнала и внешней помехи в пределах одного луча ДН антенны (цели не разрешаются по углам) РСН автоматически будет направлено в эквивалентный энергетический центр двух сигналов [2, 5]. В случае обзорной РЛС, находящейся в режиме поиска цели (обнаружения полезного сигнала), РСН будет перемещаться по заданной программе, и значения  $\theta_c$  и  $\theta_n$  будут величинами случайными. В какой-то момент времени РСН может оказаться направленным точно на источник помехового сигнала, то есть  $\theta_n = 0$ . Тогда из (7) следует, что для получения выигрыша в разностном канале должно выполняться условие

$$N_n / N_o > (1 - \mu^2 \theta_c^2) / 4G_0^2 F^2(\theta_o) \theta_c^2 \quad (8)$$

Анализ выражения (8) показывает, что в случае воздействия на РЛС маломощной помехи значимого выигрыша в отношении сигнал/шум в разностном канале по сравнению с суммарным получить не удастся. При действии же мощной помехи, существенно затрудняющей обнаружение полезного сигнала в суммарном канале, можно улучшить условия приема, перейдя к обнаружению «разностного» полезного сигнала в разностном канале на фоне скомпенсированной (после вычитания) внешней шумовой помехи.

Если мощность помехи настолько велика, что  $N_n \gg N_o$ , то из (7) следует неравенство  $|\theta_n| < |\theta_c|$ , которое является условием получения выигрыша в разностном канале.

Ниже приведены зависимости, рассчитанные по формуле (6). Расчеты проведены при  $G_0 = 10^4$ ;  $F^2(\theta_o) = 0,5$ ;  $N_n / N_o = 10; 100$ . Диаграмма направленности антенны аппроксимировалась функцией вида  $F(\theta) = \sin a\theta / a\theta$ .

Зависимости рассчитаны при  $\theta_n / \theta_o = 0,05$  (кривая 1); 0,1 (кривая 2); 0,3 (кривая 3).

Ниже линии с абсциссой  $\Lambda = 1$  находится область, когда выигрыша в разностном канале получить не удастся. Выше этой линии располагается искомая область, когда удастся улучшить условия обнаружения полезного сигнала путем перехода к разностному каналу.

Область, в которой  $\theta_c / \theta_o > 1$ , не рассматривалась, так как в этом случае происходит угловое разрешение сигналов.

## Заключение

Анализ полученных зависимостей показывает, что выигрыш  $\Lambda$  тем больше, чем точнее РСН антенны выставлено на источник помехового сигнала и чем больше угловое отклонение от РСН источника полезного сигнала. При этом, переход к обнаружению полезного сигнала в разностном канале более эффективен при большей мощности мешающего внешнего сигнала.

## Литература

1. Леонов, А. И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
2. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Хелстром, К. Статистическая теория обнаружения сигналов [пер. с англ.] / К. Хелстром – М.: ИЛ, 1963. – 434 с.
4. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
5. Вакин, С. А. Основы радиоэлектронной борьбы. Учебное пособие, часть 1 / С.А. Вакин, Л.Н. Шустов. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1998. – 435 с.

## Особенности проектирования универсальной высокоскоростной радиолинии передачи информации и взаимодействия космических аппаратов

On the design features of the space craft universal high-speed radio link for control and data transmissions

### Щесняк / Shchesnyak A.

Анна Сергеевна

(anna.schesnyak@scaegroup.com)

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», аспирант.

г. Санкт-Петербург

### Славянский / Slavyanskiy A.

Андрей Олегович

(andrey.slavyanskiy@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики», ведущий инженер-конструктор отдела комплексных средств.

г. Санкт-Петербург

### Гриненко / Grinenko Y.

Юрий Сергеевич

(jury.grinenko@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики», инженер отдела комплексных средств.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** высокоскоростная радиолиния – high-speed radio link; межспутниковый информационный обмен – satellite-to-satellite information exchange; низкоорбитальный космический аппарат – low orbit satellite; баллистически-сопряженная группа космических аппаратов – adjoint group; проектирование – design principles.

В статье представлены особенности проектирования и основные характеристики универсальной высокоскоростной радиолинии (УВРЛ) передачи информации и информационного взаимодействия космических аппаратов баллистически-сопряженной группы низкоорбитальной космической системы нового поколения. Описываются требования, предъявляемые к УВРЛ, рассматриваются варианты построения радиолинии, приводится обоснование выбора конкретного решения и технические решения построения УВРЛ.

This manuscript elaborates on the high-speed communication architecture design principles and main characteristics of the novel adjoint group of low orbit ballistic satellites. Analysis of the radio link requirements, comparative evaluation of the considerable options, as well as key parameters and characteristics for the development of the radio solutions are discussed in this paper.

### Введение

Тенденции развития технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) определяют требования к облику бортовой аппаратуры системы передачи целевой информации и высокоскоростной радиолинии, что требует модернизации при проектировании бортовой и наземной аппаратуры высокоскоростной радиолинии. Имеющиеся эксплуатируемые наземные станции приема информации ДЗЗ как системы длительного использования, приспособленные для работы с различными существующими КА ДЗЗ, должны иметь возможность осуществлять прием вновь запускаемых КА. Исходя из этого, была поставлена цель обеспечить посредством вновь проектируемых унифицированных высокоскоростных радиолиний (УВРЛ) прием информации, имеющей оперативную, научную или коммерческую ценность для потребителей.

УВРЛ должны иметь возможность принимать информацию в сантиметровом и миллиметровом диапазонах частот с правой и левой поляризацией, по нескольким каналам приема, со скоростями до 1000 Мбит/с по одному групповой каналу, с достоверностью не хуже  $10^{-6}$ .

## Требования к УВРЛ и структура УВРЛ

УВРЛ должна обеспечивать прием, хранение и передачу информации в следующих направлениях (каналах): прием/передача по радиолинии непосредственного сброса информации на стационарный или мобильный пункт приема и обработки информации (ППИ, МППИ) (для ведущего КА); прием/передача по радиолинии межспутникового информационного обмена.

Каналы сброса информации на ППИ и межспутникового информационного обмена должны обеспечивать скорость передачи информации не менее 150 Мбит/с при вероятности битовой ошибки при приеме не более  $10^{-6}$  [1].

Так как основной и ведомый КА имеют идентичное оборудование УВРЛ, в отношении любого КА баллистической группы можно ввести термин «партнёр», а «основной» и «ведомый» будут режимами функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

Структурно УВРЛ состоит из следующих элементов: канал связи со спутником-«партнёром», канал связи с ППИ, бортовая аппаратура УВРЛ, блок питания и управления УВРЛ, аппаратура координатно-временного обеспечения.

## Оценка основных параметров и характеристик УВРЛ

Далее отдельно рассмотрены канал сброса информации на наземные ППИ и канал межспутникового информационного обмена.

### Радиолиния передачи информации на наземные ППИ

В разделе представлен сравнительный анализ характеристик УВРЛ при использовании радиолинии передачи информации на наземные ППИ в следующих частотных диапазонах:

– С-диапазон частот: 3,4–3,6 ГГц, 3,6–4,2 ГГц, 4,5–4,8 ГГц, 7,25–7,3 ГГц, 7,3–7,45 ГГц, 7,45–7,55 ГГц, 7,55–7,75 ГГц;

– X-диапазон частот: 10,7–11,7 ГГц;

– Ku-диапазон частот: 12,5–12,75 ГГц, 17,3–17,7 ГГц, 17,7–18,1 ГГц.

Одной из особенностей проектирования является выбор варианта реализации УВРЛ ППИ для каждого из диапазонов частот. Данный выбор осуществляется с учетом необходимости нахождения компромиссного решения обеспечения максимальной энергетической эффективности радиолинии и минимизации энергопотребления (тепловыделения) и массогабаритных характеристик аппаратных средств бортовой аппаратуры. Прочими особенностями являются обеспечение безотказной работы радиолинии, необходимость учета ослабления сигнала в тропосфере и флуктуаций

и искажений сигнала в ионосфере, а также влияние эффекта Доплера.

С точки зрения обеспечения безотказной работы УВРЛ ППИ предпочтительнее применение группового сигнала (ГС), являющегося комбинацией нескольких парциальных сигналов (ПС), однако это требует применения технических решений, приводящих к усложнению аппаратной части.

Особенностью проектирования УВРЛ является необходимость учета дополнительного ослабления сигнала в тропосфере Земли, а также флуктуаций и искажений сигнала в ионосфере и влияние эффекта Доплера. Методы прогнозирования различных параметров распространения радиосигнала, необходимые при планировании систем "космос-Земля", работающих в направлении Земля-космос или космос-Земля, изложены в рекомендации Международного Союза Электросвязи [2]. Оценка суммарного ослабления сигнала из-за воздействия нескольких, одновременно действующих причин ослабления в неионизированной атмосфере – влияние дождя, газов, облаков и флуктуаций – должна вычисляться, в соответствии с Rec. ITU-R P.618-10, по формуле:

$$L_{\alpha\Sigma}(p) = L_{\Gamma}(p) + \left( (L_{\text{O}}(p) + L_{\text{D}}(p))^2 + L_{\text{M}}(p)^2 \right)^{0,5}$$

$$L_{\Gamma}(p) = L_{\Gamma}(p = 1\%)$$

$$L_{\text{O}}(p) = L_{\text{O}}(p = 1\%), \quad (1)$$

где  $p, \%$  – вероятность, или среднегодовой процент времени, превышения данного значения ослабления (диапазон значений в пределах от 0,001% до 50%);

$L_{\Gamma}(p)$ , дБ – ослабление в атмосферных газах, учитывающее влияние водяных паров и кислорода;

$L_{\text{O}}(p)$ , дБ – ослабление в облачности;

$L_{\text{D}}(p)$ , дБ – ослабление в дожде;

$L_{\text{M}}(p)$ , дБ – ослабление из-за тропосферных мерцаний.

Ограничения в части  $L_{\Gamma}(p)$ ,  $L_{\text{O}}(p)$  учитывают тот факт, что в большинстве случаев ослабление в облаках и ослабление в газах включены в прогноз ослабления в дожде для процентов времени меньших 1%.

Как отмечалось ранее, величина  $p$  среднегодового процента времени превышения величины  $L_{\alpha\Sigma}(p)$  дополнительных потерь (ослабления сигнала) в атмосфере связана с коэффициентом готовности  $K_{\text{ог}}$  для земных станций, расположенных на территории Российской Федерации, следующими соотношениями:

$$p_w, \% = (1 - K_{\text{ог}}) \cdot 100\%$$

$$p, \% = 0,23 \cdot p_w^{1,16} \text{ – для европейской части РФ,} \quad (2)$$

$$p, \% = 0,19 \cdot p_w^{1,12} \text{ – для засушливых умеренных регионов, полярных регионов и регионов пустынь.}$$

Таким образом, коэффициенту готовности 0,98 соответствует  $p = 0,514\%$ , коэффициенту готовности 0,995 –  $p = 0,103\%$ .

Результаты сравнения параметров УВРЛ ППИ для различных диапазонов частот при заданном диаметре рефлектора антенной системы стационарного ППИ – 5м, мобильного – 2,5м, диаметре рефлектора антенной системы УВРЛ на “ведущем” КА – 0,5м представлены в таблице 1.

По результатам представленного анализа из трех рассмотренных диапазонов частот наиболее подходящим является X-диапазон, как практически не уступающий по энергетической эффективности диапазонам с меньшей частотой и, в силу отсутствия существенных ограничений на ширину спектра сигнала, обусловленных воздействием ионосферы, не имеющий ограничений в части способа формирования и характеристик сигнала. Кроме того, в отличие от K-диапазона частот, в нем может быть обеспечен коэффициент готовности радиолинии УВРЛ ППИ на уровне не менее 0,995.

В порядке приоритета диапазоны следует расставить в следующем порядке: 10,7–11,7 ГГц, с возможностью реализации практически любых комбинаций и параметров сигналов; 3,4–4,2 ГГц, как наиболее энергетически эффективный; 7,25–7,75 ГГц, с единственным вариантом обеспечения требуемой скорости передачи данных.

В аппаратуре УВРЛ для компенсации влияния эффекта Доплера должны использоваться схемы приема сигнала с помехоустойчивым декодированием в реальном времени или схемы, которые записывают

сигнал до преобразования в цифровую форму, находят и устраняют в ней искажения (до выделения из сигнала принимаемых символов и декодирования информации), позволяя увеличить вероятность приема информации.

## Радиолиния межспутникового информационного обмена

Радиолиния межспутникового информационного обмена, измерений и управления (МРЛ КА) баллистически-сопряженной группы КА (рис. 1) предназначена для передачи информации от “ведомых” КА “ведущему” КА баллистически-сопряженной группы со скоростью от 150 до 300 Мбит/с и обеспечения взаимодействия “ведомых” и “ведущего” КА по каналу управления.

Для организации МРЛ КА Регламентом Радиосвязи отведены следующие полосы частот:

– K-диапазон: 22,55–23,55 ГГц, 24,45–24,65 ГГц, 24,65–24,75 ГГц ;

– Ka-диапазон: 27,0–27,5 ГГц, 32,3–33,0 ГГц;

– V-диапазон: 54,25–57,0 ГГц, 59–71,0 ГГц.

Применение V-диапазона частот нецелесообразно в силу существенной ограниченности доступных покупных комплектующих изделий нужной категории качества и необходимости обеспечения более жестких технологических норм.

Для сокращения номенклатуры и объема аппаратно-программных средств бортовой аппаратуры

Таблица 1

Результаты сравнения параметров УВРЛ ППИ для различных диапазонов частот

Наименование параметра УВРЛ ППИ	Значение параметра УВРЛ ППИ для диапазона частот			
	C1	C2	X	K
Полоса частот, ГГц	3,4–4,2	7,25–7,75	10,7–11,7	17,3–18,4
Поляризация	круговая	линейная	линейная	круговая
Количество ПС	2	2	2	2
Ширина спектра ПС, МГц	117,9	117,9	117,9	117,9
Максимальная скорость передачи данных ПС, Мбит/с	150	150	150	150
ЭИИМ ПС, дБВт	19,1	22,9	29,9	47,5
Интегральная ЭИИМ ПС, дБВт	22,1	25,9	32,9	50,5
Мощность ПС, Вт	0,310	0,175	0,374	8,69
Интегральная мощность ПС, Вт	0,620	0,350	0,749	17,4
Вид модуляции ПС	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
Помехоустойчивое кодирование	TPC 3/4	TPC 3/4	TPC 3/4	TPC 3/4

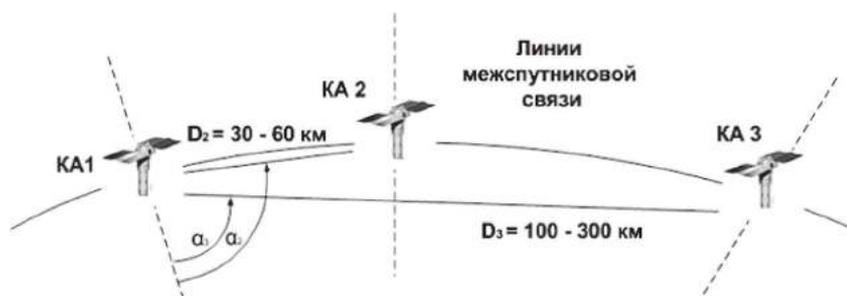


Рис. 1. Схема организации межспутниковой связи

Таблица 2

**Характеристики сигналов МРЛ КА**

№ п/п	Инф. скорость, Мбит/с	Вид модуляции	Скорость кодирования	Eb/N0, дБ	Занимаемая полоса, МГц
1	300	QPSK	3/4	4,0	235,8
2	150	QPSK	3/4	4,0	117,9

Таблица 3

**Требования по выходной мощности передающего тракта “ведомыми” КА при скорости передачи данных 300 Мбит/с**

№ п/п	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{прл}}$ Вт, не менее
1	22,55–23,55	0,116
2	24,45–24,75	0,099
3	27,0–27,5	0,081
4	32,3–33,0	0,057

“ведомого” КА необходимо унифицировать параметры сигналов и сигнально-кодую конструкцию МРЛ КА и “резервной” радиолнии передачи информации с “ведомых” КА баллистически-сопряженной группы на наземные ППИ и МППИ.

Расстояние между “ведущим” и “ведомыми” КА не превышает 300 км. Расчет радиолнии МРЛ КА производился по методике, изложенной ранее для УВРЛ ППИ, за исключением учета дополнительных потерь в атмосфере Земли, а также флуктуаций и искажений сигнала в ионосфере.

Результаты расчета требований в части ЭИИМ и выходной мощности передающей аппаратуры МРЛ КА с учетом характеристик сигналов из таблицы 2, представлены в таблице 3.

По результатам представленного анализа из трех рассмотренных диапазонов частот наиболее подходящим является Ка-диапазон как наиболее эффективный по энергетическому потенциалу и с учетом практической реализуемости аппаратуры приема-передачи.

Изменение скорости передачи данных, в случае необходимости, осуществляется посредством изменения тактовой частоты передачи символов.

## Заключение

В соответствии с результатами, представленными в таблице 1, передача информации по радиолнии на наземные ППИ предлагается реализовать в диапазоне частот 10,7–11,7 ГГц сигнала, формируемого на одной несущей с использованием модуляции QAM16, помехоустойчивого кодирования типа TPC 3/4, сигнально-кодую конструкции (СКК) ETSI EN 302 307 (DVB). Занимаемая полоса частот не будет превышать 472 МГц при максимальной скорости передачи данных 1200 Мбит/с.

Альтернативным вариантом в случае невозможности технической реализации демодулятора сигнала с указанными характеристиками является передача данных посредством группового сигнала с применением метода частотного уплотнения спектров четырех парциальных сигналов, формируемых с применением модуляции QPSK при скорости помехоустойчивого кодирования от 3/4 до 7/8. Максимальное значение информационной скорости передачи парциального сигнала – 300 Мбит/с.

Радиолнию МРЛ КА предлагается реализовать в диапазоне частот 27,0–27,5 / 32,3–33,0 ГГц (передача команд управления от “ведущего” на “ведомые” КА) / (передача информации от “ведомых” на “ведущий” КА) с использованием модуляции QPSK, помехоустойчивого кодирования типа TPC 3/4, СКК ETSI EN 302 307 (DVB). Занимаемая полоса частот не будет превышать 235,8 МГц при скорости передачи данных 300 Мбит/с, а мощность сигнала на выходе передающего тракта – 80 мВт при диаметре апертуры антенных систем МРЛ КА “ведомого” и “ведущего” КА 0,2 м.

Унификация параметров сигнала (за исключением диапазона частот) и сигнально-кодую конструкций

радиолнии МРЛ КА с УВРЛ передачи на наземные ППИ с “ведущего” КА позволит существенно сократить номенклатуру и объем аппаратно-программных средств бортовой аппаратуры.

## Литература

1. Шевчук, Р. Б., Комплексы приема информации с российских спутников ДЗЗ / Р.Б. Шевчук // Геоматика. – 2012. – № 2. – С. 66–76.

2. Рекомендация МСЭ-Р Р.618-10 “Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос”.

## Сопряжение подводных автоматизированных систем со спутниковым каналом связи

### The interface of underwater-automated systems to a satellite link

#### Янжура / Janzhura A.

Александр Станиславович

(janzhura@scaegroup.com)

кандидат физико-математических наук.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,

старший научный сотрудник

г. Санкт-Петербург

#### Осадчий / Osadchiy A.

Александр Иванович

(aleksandr.osadchiy@scaegroup.com)

доктор технических наук, профессор,

член-корреспондент РАН.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,

заместитель генерального директора по научной

работе.

г. Санкт-Петербург

#### Бушманов / Bushmanov S.

Сергей Михайлович

(bushmanov@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,

инженер.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** подводная акустическая связь – underwater acoustic communication; мультиплексирование с частотным разделением каналов – orthogonal frequency division multiplexing; оценка канала связи – channel estimation.

Рассмотрена возможность создания морского буя-ретранслятора, позволяющего организовать информационный канал между спутниковыми системами связи и автономными подводными объектами. Особое внимание уделено разработке подводного акустического канала связи, исследованы и апробированы методы передачи данных в водной среде.

The possibility of aeration a marine buoy-transponder providing a information channel between satellite communication systems and autonomous underwater objects is considered. Particular attention is paid to the organizing of the underwater acoustic channel. The methods of data transfer in the aquatic environment have been studied and tested.

#### Введение

Все большее освоение водной среды требует развития методов дистанционной коммуникации с подводными объектами. Развитие хозяйственной деятельности в арктической зоне и увеличение инженерных работ на шельфе приводит к неуклонному возрастанию исполь-

зования автономных подводных аппаратов, систем мониторинга и управления для обеспечения технологических процессов по разведке и добыче полезных ископаемых, обслуживанию трубопроводов, портовых инженерных сооружений и пр.

Обеспечить коммуникацию на акватории значительной протяженности было бы возможно с помощью спутниковой системы связи. Однако прямая передача данных со спутника в водную среду по радиоканалу неосуществима. Под водой на значительные расстояния распространяются лишь акустические волны в узком диапазоне частот. Единственный способ организовать дистанционный канал связи с подводными автономными объектами через спутниковую систему связи – использование буев-ретрансляторов, которые располагаются в районе проведения подводных работ.

В статье представлены материалы основной целью исследования, которых являлась разработка и макетная реализация такого способа передачи информации по гидроакустическому каналу связи, который бы обеспечивал надежность обмена данными при достаточно высокой скорости коммуникации – 10 кб/с и выше на удалении между объектами до 10 км.

Передача данных в водной среде является достаточно сложной и нетривиальной задачей. Гидроакустические волны, наиболее хорошо распространяющиеся в воде, подвергаются целому ряду искажающих полезный сигнал факторов: многолучевое распространение, преломление, доплеровское смещение частоты,

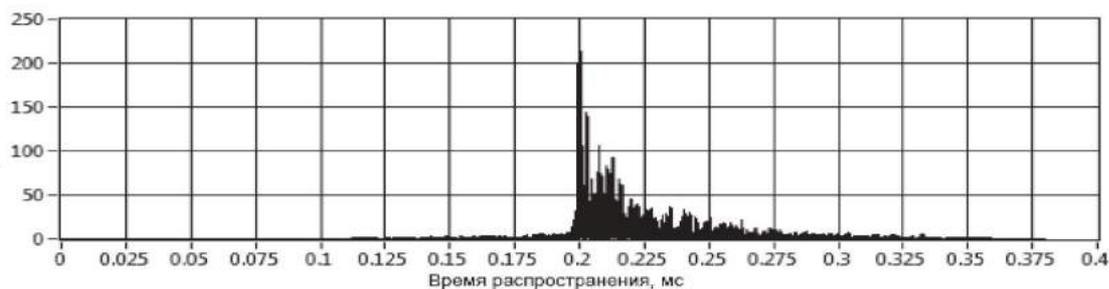


Рис. 1. Импульсная характеристика гидроакустического канала связи

частотно-селективные замирания, значительный уровень различного рода шумов и помех. Кроме того, все эти факторы крайне нестационарны и претерпевают значительные изменения в пространстве и времени [1]. Диапазон рабочих частот в гидроакустическом канале ограничен, как правило, несколькими десятками килогерц. С учетом достаточно медленного распространения звуковых волн в водной среде не удастся реализовать надежный и достаточно скоростной гидроакустический канал связи стандартными методами, успешно используемыми в других системах коммуникации. На рис. 1 показана импульсная характеристика гидроакустического канала связи, полученная в ходе эксперимента на мелководье.

Рисунок демонстрирует многолучевость распространения сигнала со значимыми амплитудами мод на протяжении примерно 25 мс.

Вышеперечисленные ограничивающие связь факторы физически не позволяют поднять скорость передачи информации более 100 бит/с в одноканальной системе передачи без адаптивной системы оценки динамических искажений даже в условиях глубокой воды, где нестационарность сигнала проявляется наиболее слабо. Однако наибольшая хозяйственная деятельность, как правило, осуществляется в шельфовой мелководной зоне, у поверхности воды или в придонной области, в условиях технологических помех инженерных сооружений, где, по понятным причинам, скорость коммуникации значительно уменьшается. Предельно малые скорости передачи информации даже при обеспечении хорошей устойчивости теряют свою актуальность.

Для повышения эффективности средств подводной цифровой коммуникации рассмотрена возможность передачи данных с использованием мультиплексирования канала связи, т.е. параллельной передачи информации на нескольких несущих частотах. При невозможности увеличения скорости передачи по одному каналу можно одновременно организовать несколько каналов. Такой метод успешно применяется в системах радио коммуникации, проводной и оптоволоконной связи. Наиболее широко используется мультиплексирование канала с ортогональным частотным разделением сигналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

При моделировании проведена адаптация данного

метода к условиям гидроакустического канала связи. Также исследовались задачи по вхождению в связь в условиях повышенного уровня различного рода помех вплоть до постановочных; коррекции частотных групповых сдвигов, вызванных эффектом Доплера в случае использования на подвижных объектах; восстановлению искаженной в результате селективных частотных потерь информации.

Для проведения исследований создана компьютерная имитационная модель, позволяющая моделировать процессы формирования и декодирования информационных сигналов передаваемых по гидроакустическому каналу связи. Модель построена в компьютерной среде разработки LabVIEW в виде функционально законченных программных модулей. На рис. 2 представлена блок-схема имитационной модели, которая позволяет получать сигнал в модуле формирования, подвергать его искажениям среды в модуле распространения и далее анализировать качество его приема в модулях синхронизации и приема.

Модуль распространения сигнала в среде включает шумовые, частотные, селективные и многолучевые искажения, которым подвергается сигнал при прохождении в реальных условиях. В этом модуле имеется возможность изменять и задавать степень каждого типа искажений в целях исследования устойчивости сигнала к помехам. На этапе моделирования был сформирован сигнал OFDM состоящий из 256 несущих частот. Метод построения OFDM сигнала заключается в математическом формировании комплексного сигнала из модулированных несущих частот с помощью алгоритмов прямого и обратного дискретного преобразования Фурье.

Несущие частоты, полученные таким образом, состоят из набора  $2N$ , что определено алгоритмом быстрого дискретного преобразования, применяемого в данной модели. Число несущих может достигать до нескольких тысяч и ограничиваться лишь максимально допустимой шириной канала связи и условиями распространения различных длин звуковых волн в водной среде. Условие ортогональности – одно из основных требований такого метода, определяющее интермодуляционное взаимодействие отдельных несущих. Оно достигается за счет определенного соотношения длительности символа к расстоянию между несущими частотами. Ортогональ-

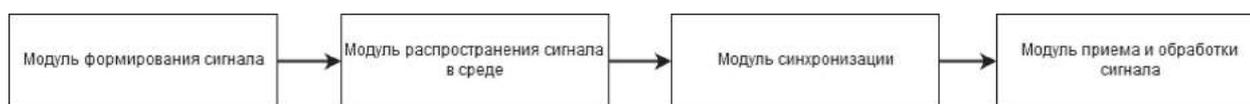


Рис. 2. Структура имитационной модели

ность позволяет избавиться от влияния отдельных несущих друг на друга при минимальном расстоянии между соседними частотами. Использование мультиплексирования позволяет увеличить в сотни и тысячи раз пропускную способность при сохранении низкой скорости передачи символов. Минимизировать искажающий фактор многолучевости позволяет способ формирования циклического префикса, который также реализован в данной модели. Несущие частоты модулируются фазовой (PSK) или квадратурной модуляцией (QAM) нижних порядков.

Расчет системы связи на основе OFDM выполнен с учетом особенностей распространения ультразвуковых акустических волн в водной среде. Прежде всего, принималось во внимание значительное влияние межсимвольной интерференции, возникающей по причине многолучевого распространения сигнала. Продолжительность интерференции может меняться в широких пределах в зависимости от условий прохождения: от 2–5 мс в открытой воде до 20 мс и более на мелководье [2]. В принципе можно спроектировать адаптивную систему связи, учитывающую длительность межсимвольной интерференции, но в модельном варианте такой задачи не ставилось из-за необходимости получения стабильных статистических результатов в определенных условиях, поэтому для расчета канала использовалось интерференционное время 20 мс, которое покрывает большинство условий распространения в реальной среде.

Исследования показали, что с использованием OFDM метода можно достичь скорости передачи полезной информации до 30 кб/с. Уменьшение количества ошибок происходит за счет использования методов избыточного кодирования. Также алгоритмы сверточного кодирования совместно с позиционным перемежением информации позволяют эффективно бороться с селективными замираниями и помехами. В этом случае наложение узкополосной помехи, например в виде тона, на полезный сигнал не приводит к каким-либо потерям принимаемой информации.

Один из важных вопросов, решенных в процессе моделирования гидроакустической системы связи – входение в связь и начальная синхронизация. Многочастотная OFDM модуляция является шумоподобным сигналом, занимающим значительную часть спектра с относительно равномерным энергетическим распределением. Такой сигнал трудно выделить на фоне естественного канального шума, а используемые в радиосвязи корреляционные методы анализа сигнала не

эффективны, так как не работают при значительных доплеровских сдвигах, возникающих в гидроакустической среде. Поэтому модель была дополнена кадровой синхронизацией с функциональной преамбулой.

В результате формируется преамбула, состоящая из ЛЧМ несущей, крайние частоты которой ограничены  $F_a$  – частотным диапазоном OFDM сигнала и четырех  $f_{n_x}$  – несущих постоянной частоты равномерно распределенных в спектре полезного сигнала. Длительность преамбулы в два раза больше длительности OFDM символа для обеспечения точности восстановления частотного домена. Структура преамбулы в частотной и временной областях показаны на рис. 3.

ЛЧМ сигнал обладает значительной устойчивостью к сдвигу Доплера и частотно-селективным замираниям. Корреляционный анализ преамбулы с ЛЧМ копией позволяет надежно выделить начало информационного кадра с незначительным смещением по времени вызванным сдвигом Доплера.

При последовательной передаче информации практически невозможно учесть нестационарность канала связи. Такая неустойчивость канальных характеристик распространения сигнала (в основном вызванных волнением поверхности воды, либо движением системы относительно шероховатого дна) компенсируется за счет синхронизации.

Проведены исследования по оптимизации плотности распределения сигналов синхронизации для «мелкой воды», когда условия распространения сигнала наиболее сложные, и условия «открытой воды», которые можно получить в глубоководных областях мирового океана. Первый результат был получен экспериментально с глубиной водоема не более 5 метров, второй – использованием гидроакустической модели, так как в этом случае модель упрощается и теоретический результат хорошо сочетается с экспериментальным. На рис. 4 показаны нормированные значения зависимости неискаженной полезной информации  $E_s$  для различного шага сигналов синхронизации в «мелкой воде» (черная линия) и в «открытой воде» (серая линия).

Из графиков видно, что в стационарных условиях достаточно использовать сигналы синхронизации на каждой десятой поднесущей частоте для надежной эквализации сигнала, однако в нестационарных условиях периодичность синхронизирующих сигналов удваивается.

Учитывая значительную нестационарность распространения, моделировался изменяющийся во времени канал связи. Для определенного дискретного набора

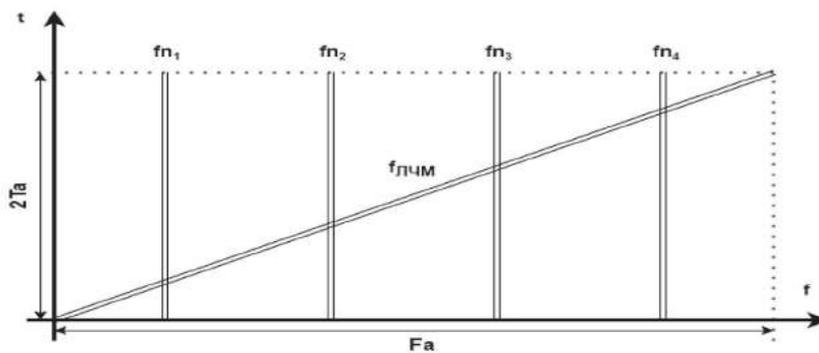


Рис. 3. Структура преамбулы кадровой синхронизации

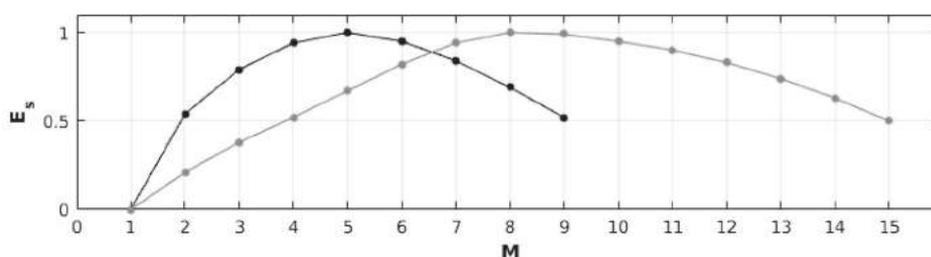


Рис. 4. Зависимость объема неискаженной полезной информации  $E_s$  от шага расположения сигналов синхронизации для различных типов распространения сигнала

многолучевых компонент  $s$  гидроакустический канал можно представить как:

$$y(\tau, t) = \sum_s A_s(t) \delta(\tau - \tau_s(t)) . \quad (1)$$

Если принять, что амплитуды в каждой моде распространения не меняются в блоке данных  $A_s(t) \approx A_s$ , то каждый путь распространения может быть связан с отдельным масштабом смещения Доплера [3]:

$$\tau_s(t) = \tau_s - a_s t . \quad (2)$$

Для простоты реализации при достоверном достижении результата была принята модель, в которой использовалось конечное число путей распространения  $N_s$ . В этом случае принятый сигнал записывается как:

$$y(\tau, t) = \sum_{s=1}^{N_s} A_s \delta(\tau - [\tau_s - a_s t]) . \quad (3)$$

## Анализ полученных результатов

Модель гидроакустического канала связи и программная часть приемо-передающего тракта системы связи выполнены в системе разработки LabVIEW в виде отдельных программных модулей. Сопряжение с реальным гидроакустическим каналом связи осуществлено с помощью специально разработанной аппаратной

части с использованием гидрофонов. Испытания проведены как в модельном варианте, так и в условиях естественной среды в дельте реки Невы и на мелководье в Ладожском озере.

Анализ экспериментов показал, что при отношении сигнал/шум 10 дБ отношение количества ошибочных бит к принятому объему информации (BER) не превышало значения  $10^{-4}$ . Эффективная скорость передачи информации составила 3000 бит/с. Вхождение в связь (распознавание начала информационного кадра) и коррекция смещения Доплера в диапазоне частот  $\pm 100$  Гц происходило в 100% случаев при отношении сигнал-шум не менее 5дБ за счет использования начальной синхронизации во временном и частотном доменах по предложенной в работе преамбуле.

## Заключение

Реализованная компьютерная имитационная модель подтвердила эффективность использования предложенных методов и алгоритмов для гидроакустической передачи данных. С помощью разработанного на базе модели макета продемонстрированы возможности подводной системы связи в реальной среде.

Отработанные в процессе моделирования и проектирования алгоритмы и программные решения можно относительно легко переложить на микроконтроллерное

устройство, что позволит создать миниатюрный и автономный модем для гарантированной передачи информации в водной среде с достаточными скоростями для решения большого круга прикладных задач.

Разработанная и апробированная система гидроакустической связи в сочетании со спутниковой системой, например Гонец, позволяет построить ретрансляционный буй для обмена информацией с удаленными подводными объектами. Полученные наработки позволяют согласовать стандартные коммуникационные протоколы с гидроакустической системой связи для дистанционного управления и передачи команд беспилотным подводным аппаратам, организовать распределенный мониторинг глубоководных объектов.

### Литература

1. Кацнельсон, Б. Г., Акустика мелкого моря / Б.Г. Кацнельсон, В.Г. Петников. – М.: Наука, 1997. – 191 с.
2. Stojanovic, M. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization / M. Stojanovic, J. Preisig // IEEE Communications Magazine. – 2009. – P. 40–47.
3. Trubuil, J. Accurate Doppler estimation for underwater acoustic communications / J. Trubuil, T. Chronavel // OCEANS, Yeosy. – May 2012. – P. 1–5.

## Сравнительный анализ технологий связи дальнего радиуса действия, применимых для сетей мониторинга в условиях сложного рельефа местности

### Analyzing long range wireless technologies for smart metering: operation under difficult propagation condition

**Омётов / Ometov A.**

Александр Ярославич

alexander.ometov@gmail.com

АО «Научный центр прикладной электродинамики», инженер-программист 2-й категории.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Интернет Вещей - Internet of Things; беспроводные сети – wireless networks; обзор – survey; сравнительный анализ – technology comparison; LoRa; SigFox; Nordic; Texas Instruments.

В статье рассмотрены доступные радиомодули дальнего радиуса действия, применяемые в сетях мониторинга городского типа. Представлены результаты сравнительного анализа устройств различных производителей по теоретически достижимым показателям производительности (максимальной пропускной способности, энергопотребления и времени жизни автономного устройства) при работе на аналоговых частотах. Рассмотрена проблема оптимизации вышеперечисленных показателей, исходя из радиуса зоны покрытия сети связи. Основным заключением является рекомендация по вводу в эксплуатацию системы, использующей протокол LoRa. Результаты, полученные в ходе данного исследования, целесообразно использовать при разработке проприетарного протокола передачи данных.

This manuscript surveys current market-available radio modules that could be potentially utilized for the metropolitan monitoring system. A comparison of the existing radio modules utilizing different protocols with maximum reachable analytical results based on the same set of carrier frequencies is provided. The paper elaborates on maximum throughput, energy consumption, and lifetime of the autonomous devices. The optimization provided in this manuscript is based on the network coverage. It is concluded that the utilization of LoRa-enabled nodes is the most appropriate within the scope of this research. The results are to be utilized for the proprietary communication protocol development.

### Введение

С ростом количества автономных устройств Интернета Вещей (Internet of Things, IoT) [1] прослеживается закономерный рост объёмов трафика, генерируемого IoT узлами.

Использование канала сотовой связи для данных машинного типа имеет свои ограничения, в основном из-за высоких энергетических затрат на передачу сообщения. С другой стороны, использование лицензированного спектра частот для крупных сенсорных сетей, хоть и видится наиболее надёжным способом, не является приемлемым в силу дороговизны производства и последующего обслуживания системы. Интуитивный шаг состоит в переходе к системам беспроводной связи, работающим в нелицензируемом частотном диапазоне [2]. В данной статье рассматриваются два существующих протокола – LoRa и SigFox [3], а также функционирование радиомодулей без специфицированного протокола передачи данных от известных производителей.

Поскольку достаточно большое число устройств IoT являются сенсорами или актуаторами, которые передают сравнительно малый объём данных за длительный интервал времени, основными требованиями при проектировании централизованной сети городского типа становится, в первую очередь, время жизни автономного устройства [4].

Целью исследования являлся сравнительный анализ набора технологий беспроводной связи дальнего радиуса действия, применимых к нераспределённым сетям мониторинга, например энергетической сети городского типа с центральным узлом обработки информации. В основу анализа была положена проблематика максимизации радиуса зоны покрытия сети, энергопотребления передатчиков, времени работы сенсора от батареи и пропускной способности канала. Сравнение показателей производительности беспроводных модулей известных компаний (Microchip Technology, Semtech Corporation, и др.) производилось с теоретически достижимыми значениями на аналоговой частоте.

Для решения оптимизационной задачи была разработана упрощённая имитационная модель, учитывающая неплотную застройку, характерную для средней полосы России. Закладывался потенциал на модер-

Таблица 1

**Основные параметры беспроводных модулей**

Параметр	Нотация	Nordic	LoRa	SigFox	TI
Пропускная способность, кбит/с	$T$	50	10	18	38
Коэффициент спектральной эффективности	$BW_{eff}$	0.8	0.8	0.8	0.5
Мощность передатчика, дБм	$P_{tx}$	20	14	20	23
Чувствительность приёмника, дБм	$R_G$	-100	-121	-119	-110
Частота, МГц	$f$	433	860	860	433

Таблица 2

**Основные параметры системы**

Параметр	Нотация	Значение
Ёмкость батареи	$E_B$	150e-3 Ач
Количество батарей	$N_B$	1 шт.
Напряжение батареи	$V_B$	3 В
Тип батареи	-	CR2032
Коэффициент саморазряда батареи	$k_{dc}$	0.05
Размер пакета данных	$p$	1024 бита
Плотность устройств	$N_d$	500 ед. на км <sup>2</sup>
Потери при прохождении препятствий	$L_{pen}$	-20 дБ
Интенсивность входного потока	$\lambda$	3 пак./день
Целевое ОСШ	$SINR_{tgt}$	5 дБ
Эффективность случайного множественного доступа	$A_{eff}$	-0.5
Аналитическое значение частоты	$f^a$	433 МГц, 760 МГц, 2.4 ГГц
Аналитическое значение максимальной мощности передатчика	$P_{max}^a$	15 дБм
Аналитическое значение коэффициента спектральной эффективности	$BW_{eff}^a$	0.8
Радиус работы	$R$	0.1-15 км

низацию приборов учёта активной электроэнергии, природного газа и водоснабжения с целью последующей комплектации устройств радио модулями, наиболее удовлетворяющими требованиям эксплуатации. Перспективным направлением исследования является разработка проприетарного протокола передачи данных от приборов учёта к центральному узлу обработки данных и соответствующего радио модуля с целью ухода от продукции иностранных производителей.

## Классификация рассматриваемых беспроводных модулей

Рассматриваемая в данной работе система имеет характерные свойства сети мониторинга, обслуживающей большое число сенсоров. За основу взяты устройства учёта, объединённые общим узлом агрегации с целью систематической передачи показателей на центральный сервер для обработки и хранения данных. Предположения о том, что датчики функционируют в нелицензируемом диапазоне и используют случайный множественный доступ, приняты с целью минимизации расходов, связанных с закупками существующих радиомодулей, а также потенциальным сокращением стоимости собственной разработки устройства.

Моделируемая сеть основывается на характеристиках города с населением порядка 1 миллиона жителей и плотностью распределения передающих устройств, равной 500 единиц на км<sup>2</sup>. Каждое устройство систематически собирает показатели и предпринимает попытку передачи случайным образом 3 раза за сутки.

В статье рассматриваются четыре флагманских беспроводных модуля, позволяющих осуществлять связь с использованием различных технологий и функционирующих в различных нелицензируемых диапазонах частот, а именно:

- Microchip Technology ATA8520D-GHQW – протокол SigFox;
- Semtech Corporation SX1273IMLTRT – протокол LoRa;
- Nordic Semiconductor ASA NRF9E5 – без определённого протокола;
- Texas Instruments (TI) CC1101 – без определённого протокола.

Последний модуль рассматривался с целью анализа потенциальной имплементации классического слотированного алгоритма ALOHA и разработки собственного протокола случайного множественного доступа с памятью. Основные параметры беспроводных модулей приведены в Таблице 1 согласно соответствующим спецификациям.

## Методика расчёта

На основании результатов исследования представлены две серии значений.

В исследовании использовалась следующая методика расчёта. Прежде всего, вычисляется количество

устройств, исходя из заданной плотности  $N_d$  и радиуса соты  $R$ :

$$N = \pi \left( \frac{R}{1000} \right)^2 N_d. \quad (1)$$

Далее, основываясь на интенсивности входного потока  $\lambda$  и выражения системы (1), вычисляется величина требуемой предоставляемой скорости доступа  $T_{req}$ :

$$T_{req} = p\lambda N / (3600 * 24) / 0.2. \quad (2)$$

Исходя из максимальной пропускной способности  $T_{max}$  можно тривиально рассчитать ширину полосы  $BW$  с учётом коэффициента спектральной эффективности  $BW_{eff}^a$ , соответствующих аналитических значений затуханий в свободном пространстве  $L^a$  (с учётом прохождения через препятствия  $L_{pen}$ ) и порога шума  $NF^a$ . Модель затухания в свободном пространстве выбрана с целью поиска верхней границы значений.

Требуемую для заданного радиуса соты мощность  $P_{req}$  можно получить из:

$$P_{req} = SINR_{tgt} + NF^a - L^a. \quad (3)$$

Далее рассчитываются энергозатраты на передачу одного сообщения в течение года:

$$E_{req} = \left( 10^{\frac{P_{req}-30}{10}} \right) \frac{P}{T_{req}}. \quad (4)$$

Исходя из соотношения (4) и значения интенсивности входного потока  $\lambda$ , рассчитывается время жизни устройств  $T_L$ :

$$T_L = \frac{3600 V_B E_B N_B}{360 (E_{req} \lambda + 10 (V_B E_B k_{dc}) N_B)}, \quad (5)$$

где учитывается влияние саморазряда батареи  $k_{dc}$  для каждого года.

Пределы производительности приводятся при использовании определённых частот  $f_i$  из таблицы 1. На всех графиках кривые с параметрами частот в условных обозначениях являются аналитическими и показывают максимально достижимые параметры системы согласно значениям из таблицы 2. Таким образом, появляется возможность расчёта параметров необходимого оборудования для конкретного приложения при функционировании на любой частоте с учётом плотности устройств, пропускной способности, требуемой дальности работы и т.п., что может быть использовано при проектировании автономных сенсорных сетей.

Важно отметить, что график времени жизни устройства учитывает только энергию, затрачиваемую на передачу информации. Реальные показатели по функционированию сенсора могут оказаться значительно меньше.

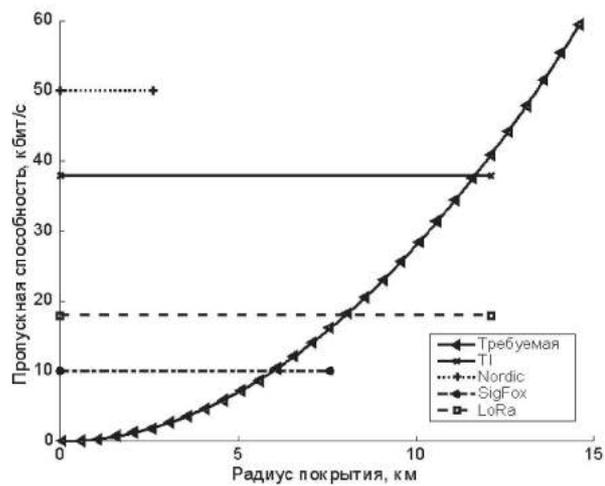


Рис. 1. Расчёт пропускной способности системы

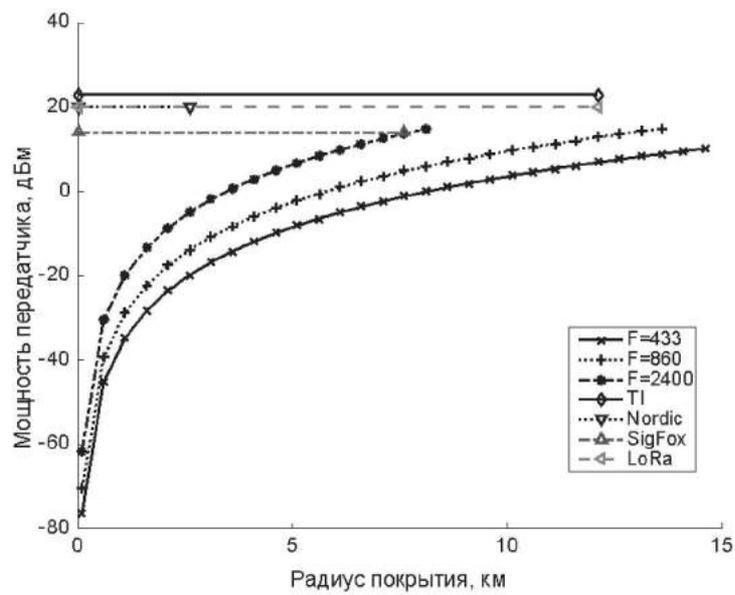


Рис. 2. Максимальная мощность передачи

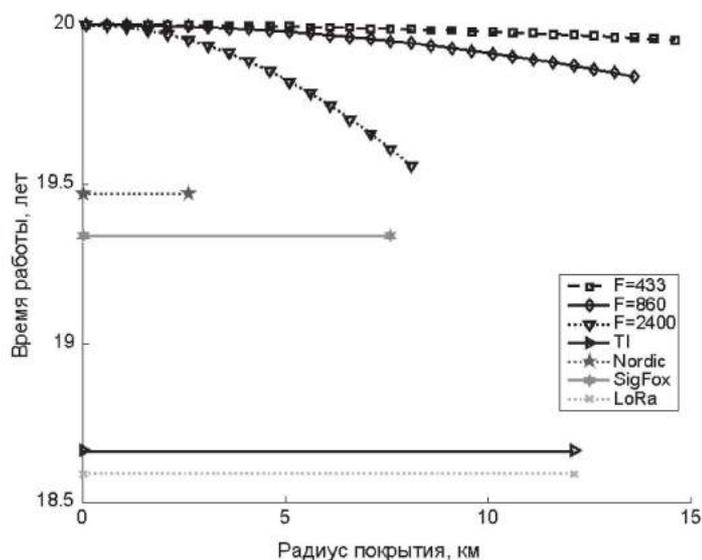


Рис. 3. Максимальное время жизни сенсора до замены источника питания

### Результаты имитационного моделирования

Зависимости пропускной способности от радиуса покрытия сети показаны горизонтальными прямыми на рис. 1 на основании (1). Крайние значения по оси абсцисс отражают максимально доступный радиус покрытия выбранного беспроводного модуля. Кривой обозначена требуемая пропускная способность, обеспечивающая функционирование сети при плотности 500 устройств на км<sup>2</sup>.

Из результатов рис. 1 видно, что модули Semtech Corporation (LoRa) и Texas Instruments удовлетворяют требованию максимизации радиуса покрытия. Второй модуль показывает двукратный выигрыш в пропускной способности, что позволяет обеспечить запас ёмкости сети при уплотнении передающих устройств в условиях меньшего покрытия. С другой стороны, он не имеет специфицированного протокола связи, что может повлечь за собой значительные накладные расходы при его разработке и имплементации.

На рис. 2 кривыми показаны требуемые для поддержания работы сети мощности передающих станций согласно выражению (3). Основные параметры приведены в таблице 2. Конечные точки кривых отражают случай, при котором связь между приёмником и передатчиком становится невозможной, исходя из свойств распространения, потерь на прохождение через препятствия и чувствительности приёмника. Прямыми линиями обозначены результаты для каждого конкретного беспроводного модуля в условиях работы на максимальном удалении от приёмника, т.е. в худшем случае.

Теоретические расчёты работы радиомодуля, произведённые с использованием выражения (5), представлены на рис. 3. Данные основаны на предположении,

что энергия потребляется только на передачу пакетов. Полученные результаты показывают крайне оптимистичную перспективу, однако стоит отметить, что реальные энергозатраты будут значительно выше из-за чередующихся циклов пробуждения/сна и циклов снятия показаний прибора. Результаты, представленные на данном графике, показывают незначительный выигрыш при использовании беспроводных модулей связи с поддержкой протоколов LoRa и SigFox. Целевое время работы устройства составляет 6 лет.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что радиомодуль от Semtech Corporation и технология LoRa являются наиболее перспективными для использования в системах городских сетей мониторинга согласно установленным требованиям. Для разработки собственного протокола передачи данных рекомендуется использовать модуль производителя Texas Instruments, как наиболее эффективный с точки зрения пропускной способности.

### Заключение

В статье предложен анализ потенциальных технологий и радио модулей дальнего радиуса действия для обеспечения сбора информации в условиях города. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что производители значительно завышают показания по дальности действия своих модулей, предполагая отсутствие плотного скопления препятствий на пути распространения сигнала. Выявлены зависимости пропускной способности, требуемой мощности передачи и времени функционирования беспроводного модуля от требуемого радиуса зоны покрытия сети. На основании расчётов, производитель Semtech Corporation

и технология LoRa были выбраны как рекомендуемые для потенциального ввода в эксплуатацию согласно заданным условиям сети. Для последующей разработки собственного протокола принято решение использовать радио модуль Texas Instruments CC1101.

### Литература

1. Кучерявый, А. Е. Интернет Вещей / А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1. – С. 21–24.
2. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. / M. Centenaro [et al.] // IEEE Wireless Communications. – 2016. – Vol. 23, № 5. – P. 60–67.
3. Кумаритова, Д. Л. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN сетей / Д.Л. Кумаритова, Р.В. Киричек // Информационные Технологии и Телекоммуникации. – 2016. – № 4. – С. 33–48.
4. Energy and delay analysis of LTE-advanced RACH performance under MTC overload. / M. Gerasimenko [et al.] // In Proc. of Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE. – 2012. – P. 1632–1637.

## Оценка точности навигационного обеспечения низкоорбитальных КА различного назначения на основе имитационного моделирования

### Accuracy assessment of navigation providing by low-orbital SV of different function on the basis of imitating modeling

**Суринов/ Surinov A.**

Анатолий Серафимович

(surinovas@mail.ru)

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,

главный научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** глобальная навигационная спутниковая система – global navigation satellite system; спутниковая навигация – satellite navigation; ГЛОНАСС – GLONASS; GPS; Galileo; функциональные дополнения – functional additions.

В статье проведен системный анализ основных характеристик радиолиний, планируемых к реализации в перспективной аппаратуре низкоорбитальных КА, а также оценены показатели точности бортовой навигационной аппаратуры на основе имитационного моделирования.

The system analysis of the main characteristics of radio links planned for implementation in the perspective equipment of low-orbit satellites is carried out in the article, as well as the accuracy indexes of on-board navigation equipment based on simulation modeling.

Эффективность целевого применения низкоорбитальных КА различного назначения (ДЗЗ, геодезические, связи и т.д.) неразрывно связана с повышением точности навигационного обеспечения, которые характеризуются следующими величинами:

- среднеквадратическое отклонение определения координат в системе координат ПЗ-90.02 или WGS-84 – не более 1 м;

- среднеквадратическое отклонение определения составляющих вектора скорости КА в режиме реального времени – не более 0,04 м/с.

Для обоснования предложений по составу, структуре и параметрам аппаратуры на основе имитационного моделирования проведен системный анализ пространственно-временных и энергетических характеристик радиолиний, планируемых к реализации в бортовой аппаратуре потребителя (БАП) НО ИСЗ, а также оценены точностные характеристики при различном построении бортовой навигационной аппаратуры.

Для моделирования радиолинии были приняты следующие исходные данные:

- Общая трасса полета НО ИСЗ на первом витке представлена на рис. 1.

- Дата испытаний: 14.07.2017, продолжительность испытаний – 1 виток НО ИСЗ (~1 час 36 мин).

Диаграммы направленности бортовых антенн направлены в верхнюю полусферу и предназначены для приема сигналов от всех ИСЗ группировки ГЛОНАСС, GPS, Galileo и ГЕО ИСЗ. Характеристика антенны приведена на рис. 2.

На основе приведенных выше исходных данных проведен энергетический расчет в радиолиниях "НКА – НО ИСЗ" с учетом объёмных диаграмм направленности. В качестве примера на рис. 3 приведен график изменения мощности входного сигнала на НКА Глонасс № 11.

Учитывая высоту полета НО ИСЗ (550–600 км), в автономном режиме работы бортовая БАП должна обеспечивать решение навигационной задачи и определение векторов состояния в непрерывном навигационном поле. Вместе с тем показатели точности определения параметров движения НО ИСЗ существенно зависят от количества НКА и их взаимного размещения (геометрического фактора).

В процессе полета НО ИСЗ суммарное количество НКА ГЛОНАСС, GPS в рабочем созвездии будет изменяться в соответствии графиком на рис. 4 (за 1 виток).

Из рисунков следует, что БАП НО ИСЗ должна обеспечивать прием не менее 25 универсальных навигационных каналов с КА Глонасс и GPS. Учитывая дальнейшее развитие ГНСС (Galileo, Beidou), число универсальных каналов приема должно быть не менее 50.

Точность определения координат и вектора скорости зависит от большого количества различных факторов: влияние тропосферы, влияние ионосферы, погрешности в определении частоты и времени, погрешности эфемерид, шумы, возникающие в приемнике, эффект многолучевого распространения и т.д.

Для оценки степени выполнения требований ТЗ проведен расчет точности определения координат и вектора скорости при различных значениях погреш-

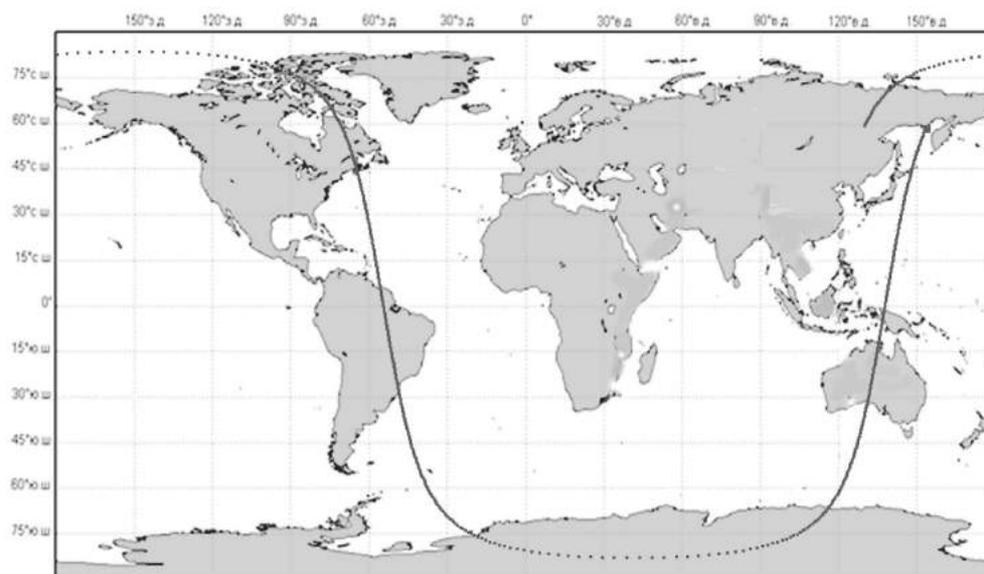


Рис. 1. Общая трасса полета НО ИСЗ за один виток

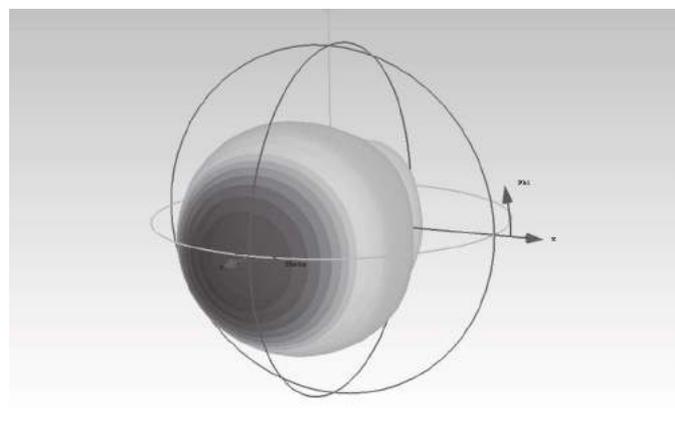


Рис. 2. Распределение коэффициента усиления (КУ) во всём телесном угле на правосторонней поляризации (частота 1559 МГц)



Рис. 3. График изменения мощности входного сигнала БАП на первом витке НО ИСЗ

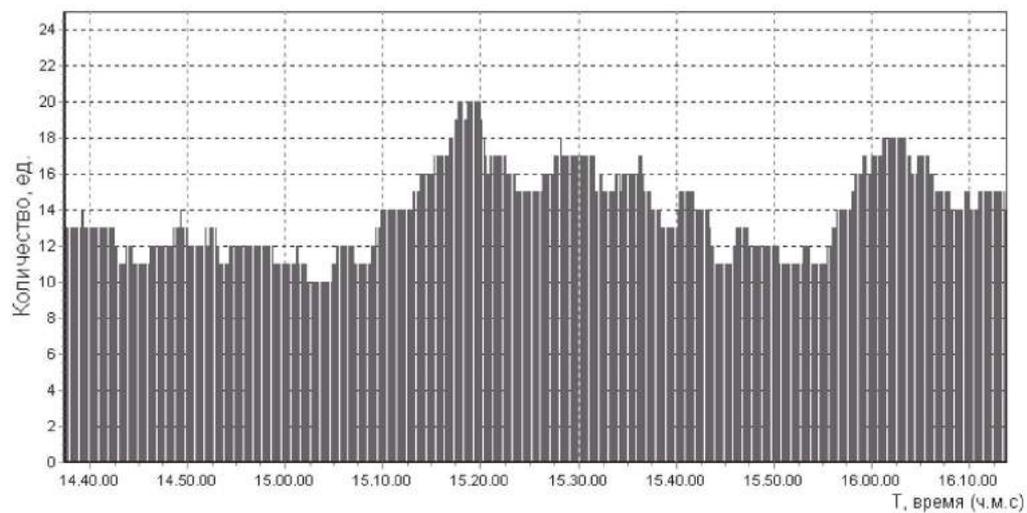


Рис. 4. Изменение количества НКА ГЛОНАСС, GPS в рабочем созвездии, видимое с НО ИСЗ в процессе полета за один виток

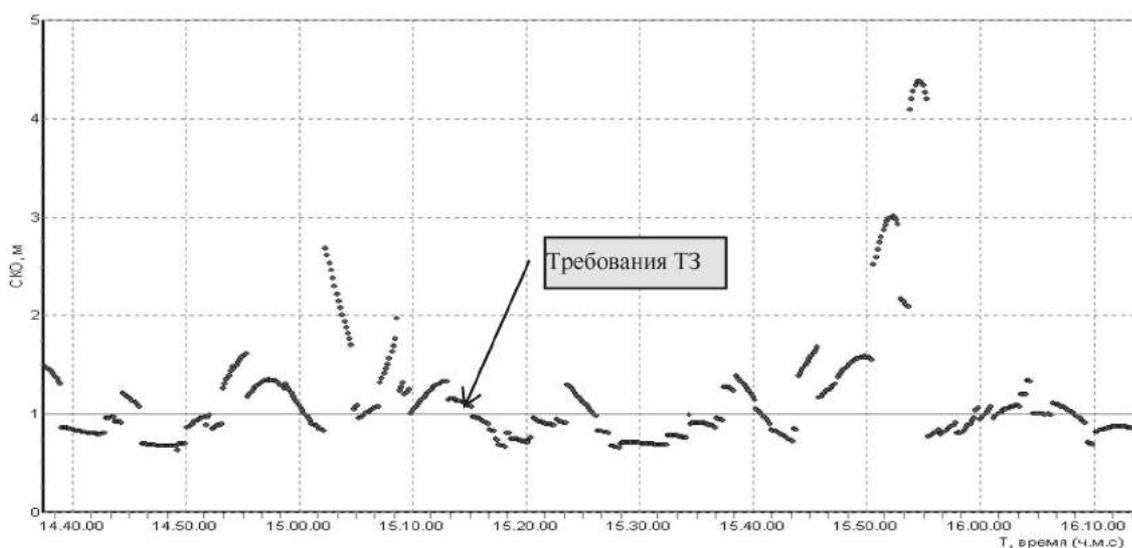


Рис. 5. Изменение во времени среднеквадратического отклонения погрешности определения координаты X

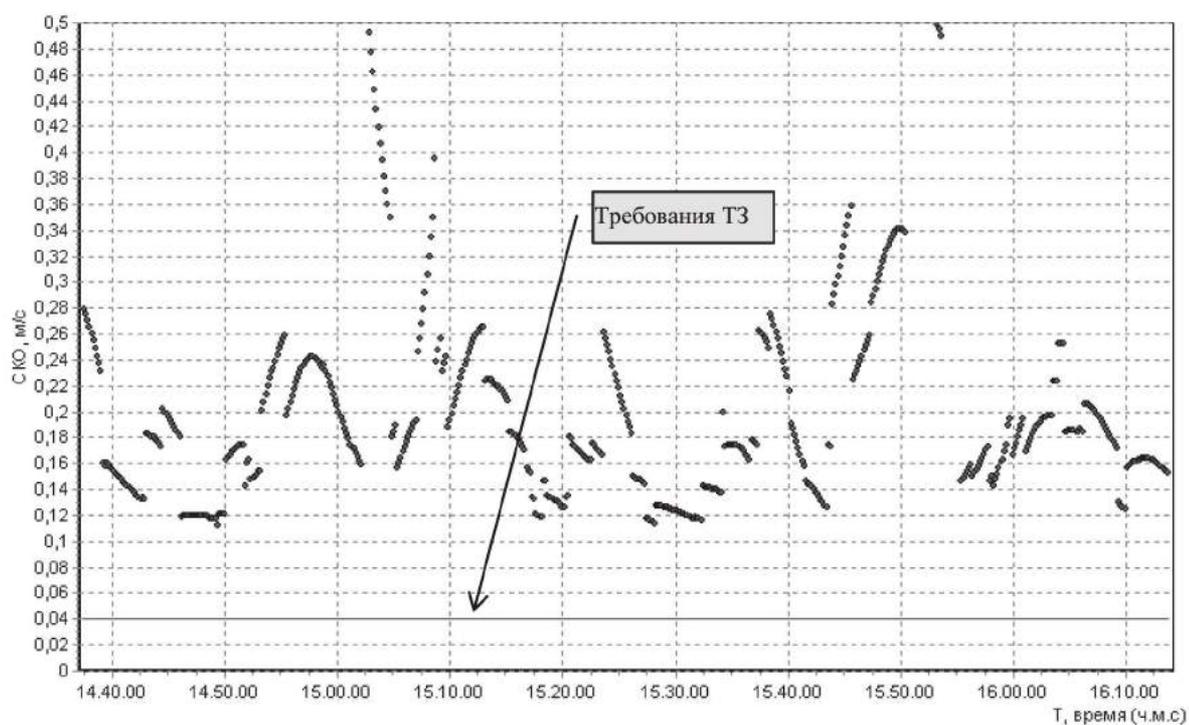
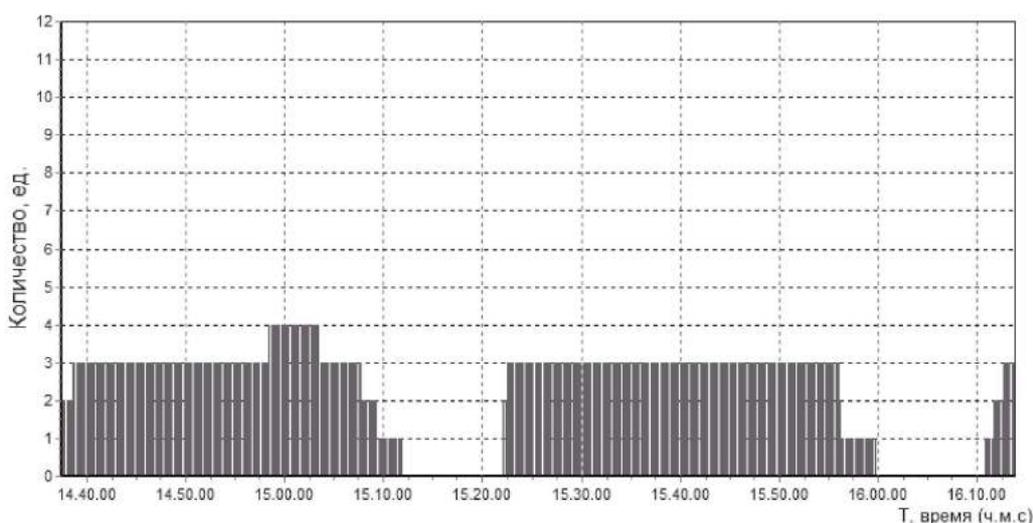


Рис. 6. Изменение во времени среднеквадратического отклонения погрешности определения составляющей вектора скорости VX



7. Изменение количества КА СДКМ и WAAS, видимых с НО ИСЗ

ностей измерения радионавигационных параметров – псевдодальности и радиальной псевдоскорости.

Уровень данных погрешностей непосредственно характеризуют качество работы аппаратуры БАП. Оценку проведем для случая проведения измерений по всем НКА ГЛОНАСС, GPS в рабочем созвездии и погрешностях (СКО) измерения псевдодальности 10 м, радиальной псевдоскорости 0.05м/с. Данные точности обеспечиваются в большинстве существующих образцов бортовых навигационных приемников.

Рис. 5 и 6 показаны среднеквадратические отклонения (СКО) погрешностей определения координаты НО ИСЗ ( $\sigma_X$ ) и составляющей вектора скорости ( $\sigma_{VX}$ ).

Из данных рисунков и результатов моделирования следует, что перспективные требования по точности определения координат  $X, Y, Z$  и составляющие вектора скорости  $VX, VY, VZ$  не выполняются.

Результаты моделирования показали, что перспективные требования по точности определения параметров движения НО ИСЗ в реальном масштабе времени могут быть выполнены при погрешностях измерения псевдодальности с СКО = 1 м, псевдоскорости с СКО = 0.01 м/с и непрерывном приеме корректирующих поправок от системы широкозонной дифференциальной коррекции. Примером таких систем является WAAS (США), EGNOS (ЕС) и отечественная система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) на базе КА Луч-5А, Луч-5Б, Луч-5В.

На рис. 7 приведено изменение количества КА системы широкозонной дифференциальной коррекции, видимых с НО ИСЗ на первом витке полета.

Из рисунков следует, что практически на протяжении всего полета НО ИСЗ обеспечивается прием корректирующих поправок в БАП. Имеются два небольших перерыва в передаче информации по 15... 20 минут.

Обеспечение непрерывности передачи корректи-

рующих поправок в перспективе будет доступно при дальнейшем развитии СДКМ.

В силу особенностей географического расположения РФ в ее северной части затруднен или невозможен прием сигналов с геостационарных спутников. Именно поэтому существенно предпочтительнее выглядит использование в качестве ретрансляторов навигационного сигнала спутников связи на высокоэллиптических орбитах (НИР «Эллипс»).

Так, орбитальная группировка из шести спутников с параметрами орбит: периодом  $T = 23$  ч 56 мин; высотой апогея  $H_a = 38820$  км и перигея  $H_x = 32750$  км; наклоном  $i = 64,8^\circ$ ; аргументом перигея  $\omega_l = 270^\circ$  – и совершающих полет по двум трассам с географическими долготами перигея-апогея  $-60^\circ$  и  $120^\circ$  (рис. 8) обеспечит возможность получения информации ФД одновременно с двух КА на 34,5 % территории Земли (рис. 9) в пределах зоны орбиты, контролируемой ЗС, расположенными на территории РФ.

### Выводы

1. Анализ результатов моделирования показал, что полученная мощность полезных сигналов НКА на входе приемника ГНСС НО ИСЗ очень небольшая и составляет порядка  $-155...-163$  dBW. В связи с этим чувствительность разрабатываемой БАП должна быть не хуже  $-165...-167$  дБВт.

2. БАП НО ИСЗ должна обеспечивать прием не менее 25 универсальных навигационных каналов с КА ГЛОНАСС и GPS. Учитывая дальнейшее развитие ГНСС (Galileo, Beidou) число универсальных каналов приема должно быть не менее 50.

3. Перспективные требования по точности определения параметров движения НО ИСЗ в реальном масштабе времени могут быть выполнены при погреш-

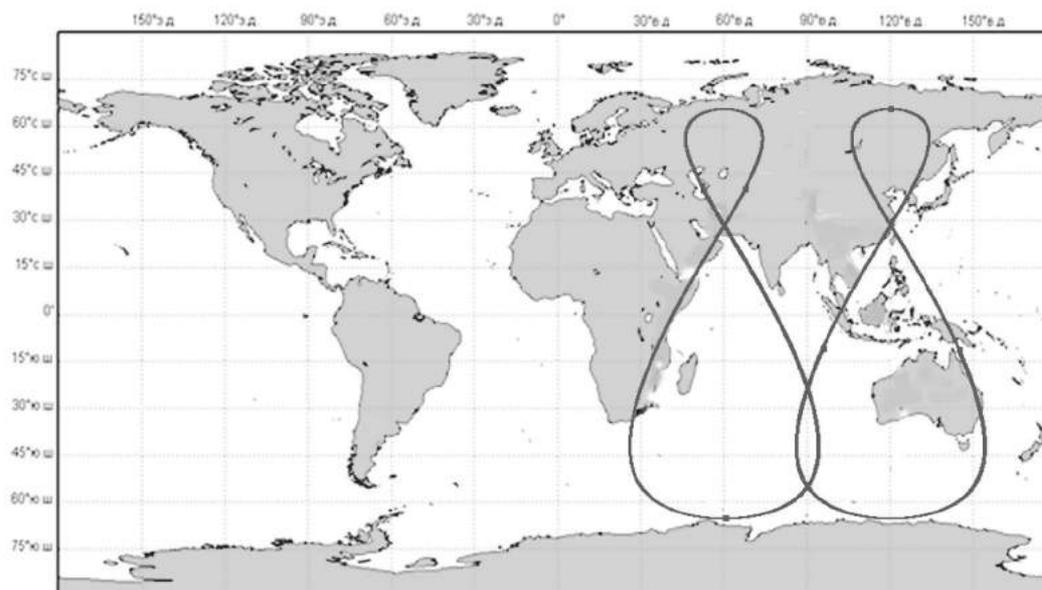


Рис. 8. Трассы спутников на геосинхронных эллиптических орбитах

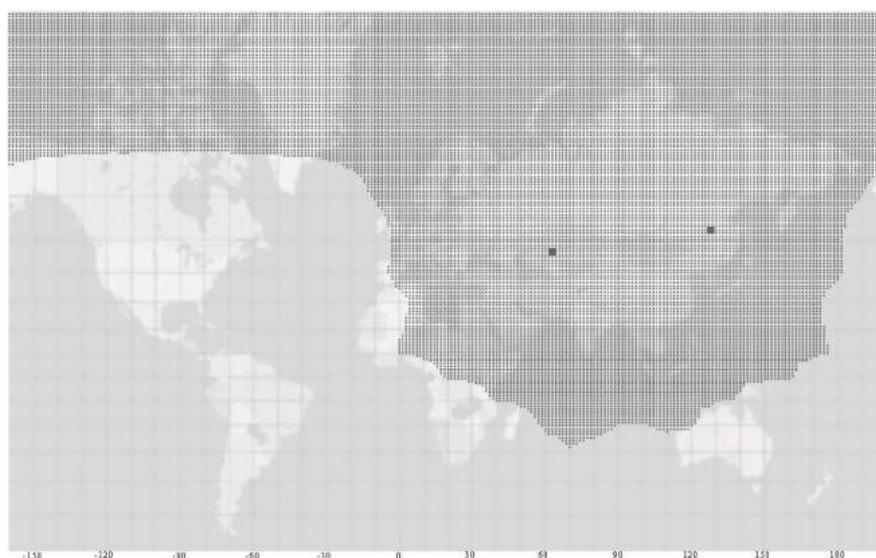


Рис. 9. Зона передачи информации с двух КА ВКК одновременно

ностях измерения псевдодальности с СКО = 1 м, псевдоскорости с СКО = 0.01 м/с и непрерывном приеме корректирующих поправок от системы широкозонной дифференциальной коррекции. Примером таких систем является WAAS (США), EGNOS (ЕС) и отечественная система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) на базе КА Луч-5А, Луч-5Б, Луч-5В.

## Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И.Перова, В.Н.Харисова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
2. Перспективный высокоточный комплекс функционального дополнения глобальных навигационных систем на базе системы дифференциальной коррекции и мониторинга / В.В. Дворкин [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 1. – С. 23–32.
3. Новый сервис высокоточного позиционирования G2 для GPS и ГЛОНАСС / Т. Мелгард [и др.] // Геопрофи. – 2010. – № 5. – С. 11–17.

## Новые результаты в редуцированном оценивании и их применение для формирования групповой шкалы времени

### New results in the reduced estimation and their application for a group time scale forming

#### Алёшкин / Aleshkin A.

Андрей Петрович

(a\_aleshkin@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского»

(ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ,

профессор кафедры.

г. Санкт-Петербург

#### Макаров / Makarov A.

Андрей Александрович

(almakand@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

докторант кафедры.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** шкала времени – time scale; синхронизация – sync; смещенные оценки – shifted estimates; коэффициент редукиции – reduction ratio.

В статье рассмотрены особенности известных скалярных и векторных оценок. Предложены процедуры с иным способом формирования коэффициента редукиции. Предложен новый вариант редукиции отдельно взятого  $i$ -го элемента  $m$ -мерного вектора параметров по принципу формирования скалярной редуцированной оценки Рао. Рассмотрены степенные варианты формирования коэффициента сжатия. Представлены результаты моделирования для различных условий применения предложенных алгоритмов.

The features of known scalar and vector estimates are considered in the article. Procedures with a different method of forming the reduction coefficient are proposed. A new version of the reduction of the separately taken  $i$ -th element of the  $m$ -dimensional parameter vector is proposed based on the principle of the formation of the scalar reduced estimate Rao. Power-law variants of forming the compression coefficient are considered. The results of modeling for various conditions of application of the proposed algorithms are presented.

Применительно к решению задач частотно-временного обеспечения представляется перспективной реализация стохастического подхода, ориентированного на формирование усредненной шкалы времени при использовании нескольких источников скалярных временных шкал [1].

#### Алёшкин / Aleshkin N.

Никита Андреевич

(nikita.aleshkin@scaegroup.com)

кандидат технических наук.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,

координатор научно-производственного процесса.

г. Санкт-Петербург

В теории статистического оценивания получили распространение процедуры формирования несмещенных оценок, основанные на критериях максимально правдоподобного выбора, которые при нормальной статистике исходных данных совпадают с оценкой наименьших квадратов.

Вместе с тем известно, что дальнейшее снижение погрешностей оценивания по критерию полной квадратичной ошибки возможно при использовании алгоритмов смещенного оценивания.

Существует ряд алгоритмов указанного типа.

Применительно к рассматриваемой задаче представляется обоснованным привлечение редуцированных оценок.

Потенциальные свойства отмеченных алгоритмов достаточно хорошо исследованы как для скалярных, так и для векторных процедур смещенного оценивания.

Скалярный вариант редуцированной оценки параметра  $x$  имеет вид:

$$x^* = x_{\text{оп}} + r(\hat{x} - x_{\text{оп}}),$$

а при  $x_{\text{оп}} = 0$ :  $x^* = r\hat{x}$ , где  $\hat{x}$  – его несмещенная оценка с дисперсией  $\delta^2$ ,  $x_{\text{оп}}$  – опорное значение.

Погрешность этой процедуры редуцированного оценивания характеризуется функцией:

$$f(x^*) = (r-1)^2 x^2 + r^2 \sigma^2 = \sigma^2 \{(r-1)^2 \delta^2 + r^2\}.$$

Для определения оптимального коэффициента редукиции выполним операцию  $\frac{df(x^*)}{dr} = 0$ . Тогда справедливо  $r = \frac{\delta^2}{1 + \delta^2} = \frac{x^2}{x^2 + \delta^2}$ .

А скалярная редуцированная оценка с оптимальным коэффициентом редукции примет вид:  $x_o^* = \frac{x^2}{x + \delta^2} \hat{x}$ .

Показано, что её точность возрастает при увеличении дисперсии шума исходных наблюдений и близости принятого за опорное значения к истинной величине.

В случае применения векторной редукции точность оценивания может быть дополнительно увеличена путем наращивания объема выборки, по которой формируется опорное значение.

Достоинство процедуры редуцированного оценивания заключается в том, что при ее реализации параметр регуляризации – коэффициент редукции – формируется автоматическим образом. При этом потенциальные возможности оценивания достигаются, если известно точное значение опорной величины, то есть истинное значение оцениваемого параметра. Понятно, что если исследователь располагает подобной информацией, то собственно процесс оценивания лишен смысла.

Поэтому на практике исследователю предлагается применение алгоритмов, в которых истинная величина оцениваемого параметра заменяется ее несмещенной оценкой.

Тогда алгоритм скалярной редукции примет вид:

$$x^* = \frac{\hat{x}^2}{\hat{x}^2 + \delta^2} \hat{x}.$$

В действительности для ряда ситуаций такой подход оказывается весьма результативным. Вместе с тем при наличии дополнительной информации можно предложить процедуры с иным способом формирования коэффициента редукции. Результаты исследований в этом направлении и представляют основу содержания данной статьи.

Пусть  $\hat{x}$  нормально распределенная несмещенная оценка векторного параметра из  $m$  элементов:

$$\bar{x} = [x_1 \dots x_m]^m.$$

Рассмотрим векторную редуцированную оценку вида  $\bar{x}^* = r \bar{x}$ .

По принципу формирования скалярной редуцированной оценки Рао [2] был предложен вариант редукции отдельно взятого  $i$ -го элемента  $m$ -мерного вектора в соответствии со следующим алгоритмом:

$$x_{oi}^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{x}_i + \frac{\left( \hat{x}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{x}_i \right)^2}{\left( \hat{x}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{x}_i \right)^2 + \delta_i^2} \hat{x}_i.$$

Оценка с оптимальным коэффициентом редукции может быть представлена в виде:

$$x_{oi}^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{x}_i + \frac{\left( x_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \right)^2}{\left( x_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \right)^2 + \delta_i^2} \hat{x}_i.$$

В общем случае для векторной редукции при детерминированном  $r$  справедливо следующее выражение для полной суммы квадратов ошибок:

$$L(\bar{x}^*) = (r-1)^2 \bar{x}^T \bar{x} + m r^2 = m \left( (r-1)^2 \delta^2 + r^2 \right),$$

где  $\delta^2 = \bar{x}^T \bar{x} / \delta^2$ . Здесь  $\delta^2$  – дисперсия скалярного элемента  $\hat{x}_i$  вектора  $\bar{x}$ .

Для простоты иллюстрации предполагается, что элементы равнозначны.

Минимум выражения  $L(\bar{x}^*)$  достигается при  $r = \delta^2 / (m + \delta^2)$ .

Тогда по аналогии с принципом формирования коэффициента редукции для скалярных алгоритмов [3] можно записать:

$$\bar{x}_o^* = r \hat{x} = \frac{\delta^2}{m + \delta^2} \hat{x} = \left[ 1 - \frac{m \delta^2}{m \delta^2 + \bar{x}^T \bar{x}} \right] \hat{x}.$$

При этом

$$L(\bar{x}^*) = L(\bar{x}^*)_{min} = m \delta^2 \frac{\delta^2}{m + \delta^2} < m \delta^2 = L(\hat{x}).$$

Эта оценка является равномерно более точной, чем несмещенная оценка  $\hat{x}$ . Однако это не означает более высокой точности каждой индивидуальной оценки  $x_i^*$  вектора  $\bar{x}^*$  в сравнении с ее несмещенным аналогом. Использование рассматриваемого алгоритма оценивания приводит к повышению точности оценивания отдельного элемента вектора лишь при выполнении условия  $\delta_i^2 < 1 + 2\delta^2 / m$ , или  $x_i^2 \delta^2 + 2\bar{x}^T \bar{x} / m$ .

В ситуации, когда абсолютные значения оцениваемых параметров оказываются значительными в сравнении с дисперсией шума их искажающего, более эффективной оказывается следующий вариант редуцированной оценки:

$$x_{2oi}^* = \bar{x} + \frac{\gamma^2}{m + \gamma^2} \hat{x} = \bar{x} + \left[ 1 - \frac{m \delta^2}{m \delta^2 + \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right] (\hat{x}_i - \bar{x}),$$

где  $\gamma^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{\delta^2}$ ,  $\bar{x}$  – арифметическое среднее элементов вектора.

Очевидно, что на практике эти алгоритмы оценивания не применимы, так как не известны значения  $\delta^2$  и  $\gamma^2$ .

Обратимся к имеющему прикладной смысл варианту оценки:

$$x_{2i}^* = \hat{x} + \frac{\gamma^2}{m + \gamma^2} \hat{x} = \hat{x} + \left[ 1 - \frac{m \delta^2}{m \delta^2 + \sum_i (\hat{x}_i - \hat{x})^2} \right] (\hat{x}_i - \hat{x}).$$

где  $\hat{\gamma}^2 = \frac{\sum_i (\hat{x}_i - \hat{x})^2}{\delta^2}$ ,  $\hat{x}$  – арифметическое среднее элементов вектора  $\hat{x}$ .

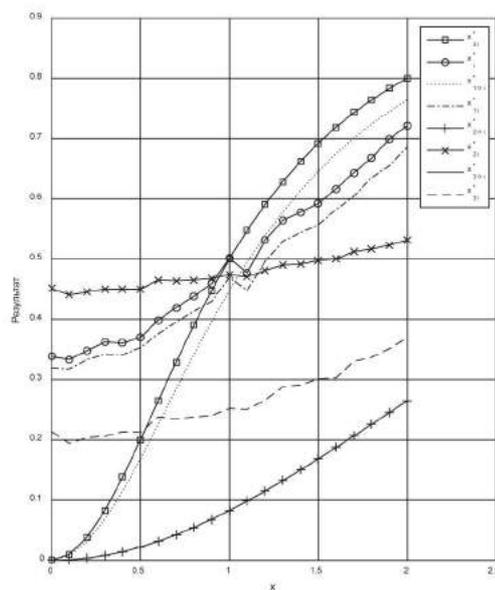


Рис. 1. Зависимость коэффициента редукции от параметра  $x$  для варианта №1

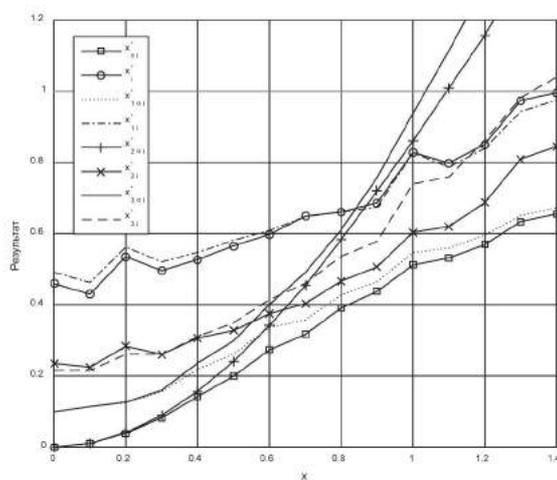


Рис. 2. Отношение погрешности редуцированной оценки к дисперсии несмещенной для варианта №1

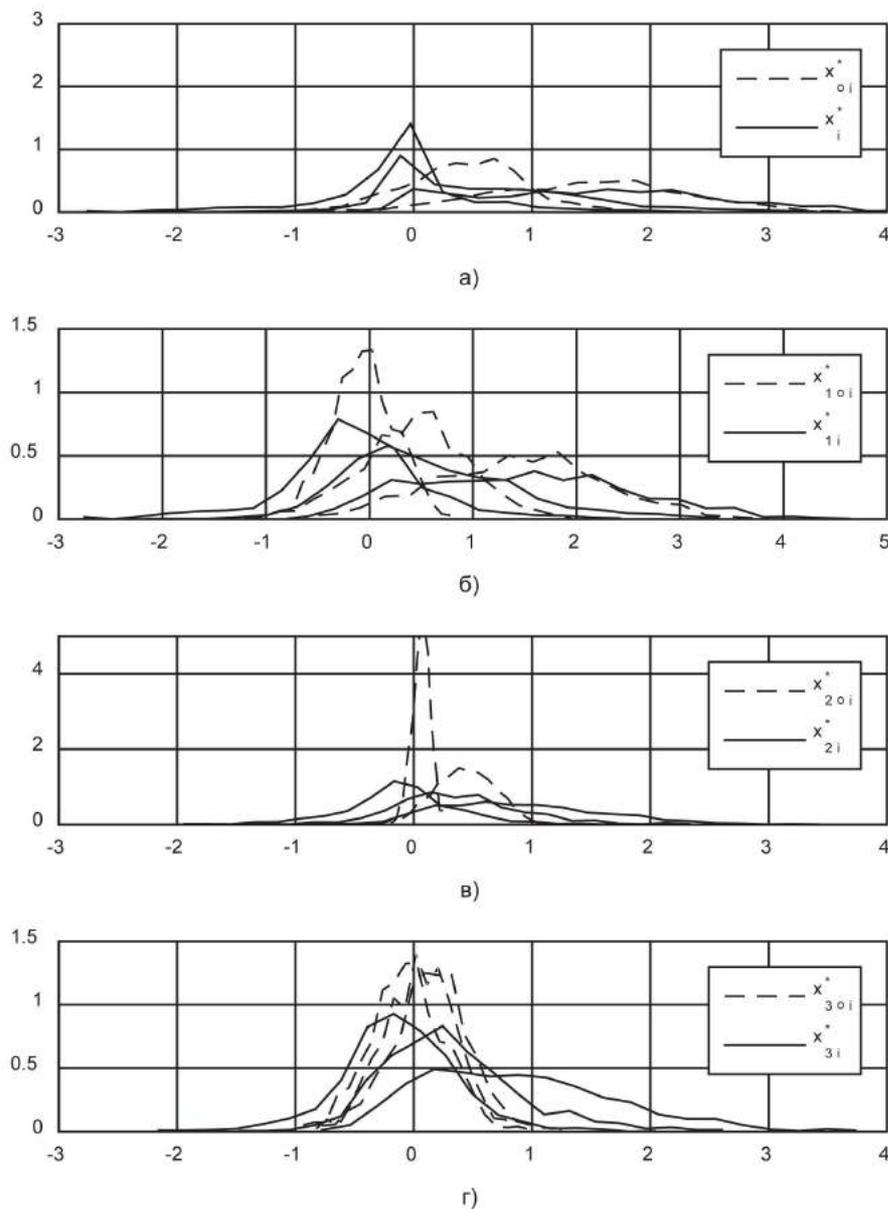


Рис. 3. Графики огибающих гистограмм для варианта №1

Также известен вариант редуцированной векторной оценки следующего вида:

$$x_{3oi}^* = \hat{x} + \left[ 1 - \frac{(m-3)\sigma^2}{\sum_i^m (x_i - \bar{x})^2} \right] (\hat{x}_i - \hat{x}),$$

$$x_{3i}^* = \hat{x} + \left[ 1 - \frac{(m-3)\sigma^2}{\sum_i^m (\hat{x}_i - \hat{x})^2} \right] (\hat{x}_i - \hat{x}).$$

Рассмотрим векторную редуцированную оценку  $\bar{x}^* = r^A \hat{x}$ .

Здесь  $A$  степень возведения коэффициента редукции. Таким образом, предлагается рассмотреть степенной

вариант формирования коэффициента сжатия с целью приблизить его значение к величине, обеспечивающей потенциально достижимый эффект от применения редукции. Авторами выполнены исследования по поиску эффективных значений параметра  $A$  и условий их наиболее рациональной реализации применительно к синтезу групповой шкалы времени в задаче частотно-временного обеспечения потребителя. Результаты моделирования для различных условий применения алгоритмов приводятся ниже.

Вариант №1. Степень редукции  $A = 1$ ; математическое ожидание шума равно нулю; СКО шума  $\sigma = 1$ ; длина вектора  $m = 10$ ; номер изменяемого элемента вектора  $i = 3$ .

Вариант №2. Отличие от варианта 1 – степень редукции  $A = 1, 3, 5, 7$ ; длина вектора  $m = 20$ .

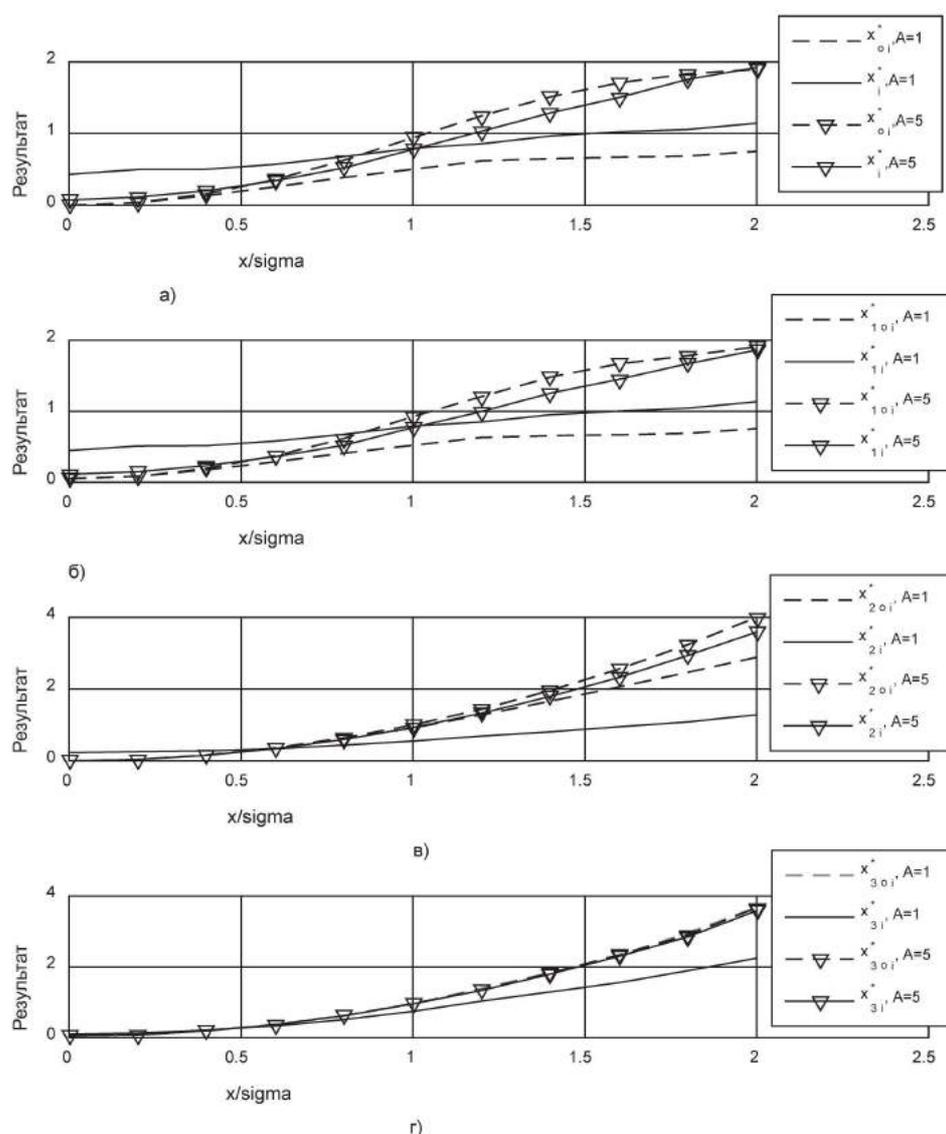


Рис. 4. Графики зависимости погрешности редуцированного оценивания от параметра  $A$  для условий варианта №2

## Заключение

В ходе выполненных исследований рассмотрены процедуры для различных вариантов векторного редуцированного оценивания при отличающихся исходных данных применительно к формированию групповой шкалы времени в задаче частотно-временного обеспечения потребителей. Апробированы оригинальные алгоритмы редукции, в которых вместо традиционного способа замены опорного значения его несмещенной оценкой предложен вариант степенного формирования коэффициента редукции. Анализ графически представленных результатов моделирования (рис. 1–4) позволит исследователю определить условия наиболее эффективной реализации того или иного алгоритма по критерию минимума полного квадрата погрешности оценивания.

Представляется перспективным направлением дальнейших исследований определение устойчивости пред-

ложенных процедур к априорной неопределенности относительно стохастических параметров используемых оценок и степени неточности задания опорных значений стабилизирующего функционала.

## Литература

1. Служба и средства измерения времени / А.Н. Беспалов [и др.] – МО, 1988. – 152 с.
2. Алёшкин, А. П. Основы теории адаптивного смещенного оценивания с нелинейными ограничениями и ее применение к решению некорректных навигационных задач / А.П. Алёшкин. – СПб.: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 2001. – 153 с.
3. Степанов, М. Г. Введение в теорию смещенного оценивания параметров движения космических аппаратов по ограниченному данным / М.Г. Степанов – СПб.: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1993. – 135 с.
4. Соболев, И. М. Метод Монте-Карло / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1968. – 64 с.

## Применение мобильных длиннобазовых радиотелескопов для повышения устойчивости координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей

### Application of mobile longspan radio telescopes for an increase in stability of coordinate and time and navigation providing consumers

#### Алёшкин / Aleshkin A.

Андрей Петрович

(a\_aleshkin@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского»

(ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ,

профессор кафедры.

г. Санкт-Петербург

#### Макаров / Makarov A.

Андрей Александрович

(almakand@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

докторант кафедры.

г. Санкт-Петербург

#### Иванов / Ivanov D.

Дмитрий Викторович

(dvi@iaaras.ru)

кандидат физико-математических наук.

ФГБУН Институт прикладной астрономии РАН,

генеральный директор.

г. Санкт-Петербург

#### Алёшкин / Aleshkin N.

Никита Андреевич

(nikita.aleshkin@scaegroup.com)

кандидат технических наук.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,

координатор научно-производственного процесса.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: РСДБ – VLBI; КВНО – СТНП; системы координат – coordinate systems; шкала времени – time scale; синхронизация – sync.

В статье рассмотрена методика, используемая при моделировании процесса определения координат мобильной станции по наблюдениям радиоинтерферометрических комплексов с длинной базой (РСДБ) путем решения обратной задачи по методу наименьших квадратов. Применение мобильных длиннобазовых радиотелескопов позволяет повысить устойчивость координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей.

The article is technique used in modeling the procedure for determining the coordinates of a mobile station based on observations of radiointerferometric complexes with a long base (VLBI) by solving the inverse problem using the least-squares procedure is considered. The use of mobile long-base radio telescopes makes it possible to increase the stability of the coordinate-time and navigation support of consumers.

Возрастающие требования к качеству координатно-временных определений потребителя, выполняемых на основе спутниковых навигационных технологий, приводит к необходимости совершенствования координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО). Одно из направлений модернизации отечественной системы

ГЛОНАСС связано с переходом комплекса КВНО на беззапросные технологии траекторных измерений. Эти технологии обладают большей производительностью и информативностью по сравнению с запросными, однако их применение затруднено уходом шкал времени (ШВ) часов пунктов наземного комплекса управления ГЛОНАСС относительно ШВ центрального синхронизатора (ЦС).

Для выполнения фундаментальных научных исследований и решения прикладных хозяйственных и оборонных задач большое значение имеет оперативная информация о Всемирном времени и параметрах вращения земли (ПВЗ). Только РСДБ позволяет измерить ПВЗ, Всемирное время и непосредственно установить связь земной и небесной систем координат. Потому РСДБ-технологии стали основой КВНО системы ГЛОНАСС. Точность определения координат РСДБ станций прогнозируется в ближайшем будущем не хуже 2 мм [1]. Кроме того, космические источники излучения формируют сигналы естественного происхождения и, следовательно, обладают повышенной помехоустойчивостью. Обычно радиоинтерферометр состоит из двух радиотелескопов, разнесенных на сотни или тысячи километров и наблюдающих один и тот же квазар. Так как квазары находятся от Земли на расстоянии в десятки и сотни миллионов световых лет, приходящие от них радиоволны имеют идеально плоский фронт, а поступающие на оба радиотелескопа сигналы приходят по строго параллельным путям. Эти шумовые сигналы совершенно идентичны,

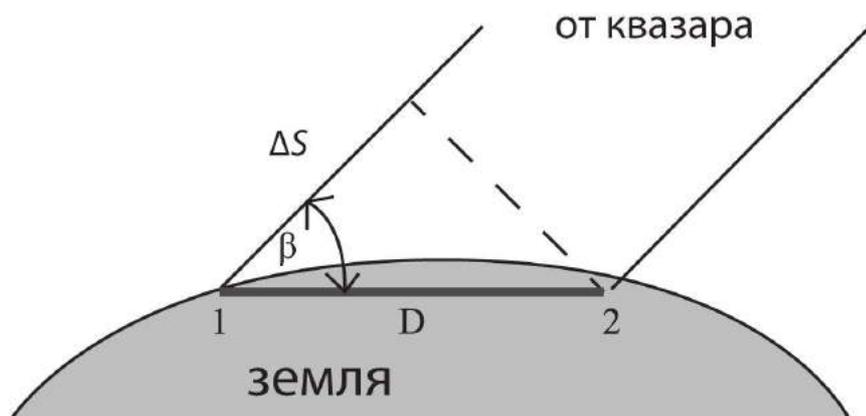


Рис. 1. Радиоинтерферометр, состоящий из двух радиотелескопов

но приходят на радиотелескопы с некоторой временной задержкой один относительно другого, обусловленной разностью расстояний от радиотелескопов до квазара.

Представим алгоритм уточнения координат мобильного варианта РСДБ (МРСДБ) на основе определения разности времен прихода сигнала от одного и более квазаров до мобильного и стационарного телескопа, координаты которого известны с достаточной точностью. Проводя одновременные измерения по квазарам, определяем текущие координаты МРСДБ. Зная значения этих координат, базу, можно реализовать процедуру сличения ШВ с высокой степенью точности. Каждое  $i$ -е наблюдение источника с координатами  $(\alpha_i, \delta_i)$  выполняется в момент звездного времени  $t_i$ , где  $\alpha_i$  – угол склонения источника,  $\delta_i$  – угол восхождения источника.

Излучение от квазара приходит на радиотелескопы 1 и 2 с задержкой  $\tau$ , обусловленной разностью хода  $\Delta S$  (рис. 1). Вектор базы  $D$  имеет длину  $D = \Delta S / \cos \beta$ , а так как  $\Delta S = V\tau$ , где  $V$  – скорость радиоволн, то  $\tau = (D/V) \cos \beta$ .

Эта задержка измеряется корреляционным методом. Записи сигналов  $S(t)$  и  $S(t+\tau)$  на телескопах 1 и 2 сводятся в корреляторе, на выходе которого воспроизводится корреляционная функция  $(\tau) = \langle S(t) \cdot S(t+\tau) \rangle$ , имеющая максимум при  $\tau=0$ . Сдвигая записи до появления максимума выходного сигнала коррелятора, определяют задержку  $\tau$ , равную величине сдвига.

Задержка  $\tau_i$  может быть представлена соотношением:

$$\tau_i = \frac{1}{c} (\cos \delta_i ((x_1 - x_2) \cos(\alpha_i - \omega t_i) + (y_1 - y_2) \sin(\alpha_i - \omega t_i)) + (z_1 - z_2) \sin \delta_i), \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света;  $\omega$  – угловая скорость вращения земли;  $x_1, y_1, z_1$  – координаты радиотелескопа 1;  $x_2, y_2, z_2$  – координаты радиотелескопа 2.

Записи сигналов на радиотелескопах привязаны к единой шкале времени, для чего их часы необходимо синхронизировать как можно точнее. Для этого местные стандарты частоты и времени контролируются по высокостабильному атомному эталону. Метки времени запи-

сываются вместе с записью разности сигналов на обеих станциях РСДБ, и именно по сдвигу временных меток определяют задержку при корреляционной обработке записей.

Основой методики определения координат мобильной станции по РСДБ наблюдениям посредством решения обратной задачи является формирование уравнения наблюдения вида [4, 5, 6]  $\nabla \tilde{\tau}_{n \times 1} = A_{n \times 3} * \nabla \tilde{q}_{3 \times 1}$ .

Для этого:

1. Определяем количество точек измерений, соответствующих времени наблюдения  $t = 1, 2, \dots, i, \dots, n$ .
2. Выбираем истинные значения координат второго мобильного радиотелескопа (МРСДБ)  $\tilde{q}_{2 \text{ист}} = [x_{2 \text{ист}}, y_{2 \text{ист}}, z_{2 \text{ист}}]$ .
3. С учетом п. 1 рассчитываем истинные значения задержки прихода сигнала от квазара по формуле (1)  $\tau_{1 \text{ист}}, \tau_{2 \text{ист}}, \dots, \tau_{i \text{ист}}, \tau_{n \text{ист}}$ .
4. Формируем шум размерности  $[n \times 1]$  по нормальному закону распределения с параметрами  $\tau_{1 \text{шум}}, \tau_{2 \text{шум}}, \dots, \tau_{i \text{шум}}, \tau_{n \text{шум}}$  и возмущаем им истинные значения задержки прихода сигнала от квазара, полученные в п. 3, по формуле

$$\tilde{\tau}_{\text{ист}} = \tau_{\text{ист}} + \tau_{\text{шум}},$$

получаем вектор размерности  $[n \times 1]$  зашумленных истинных значений задержки

$$\tilde{\tau}_{1 \text{ист}}, \tilde{\tau}_{2 \text{ист}}, \dots, \tilde{\tau}_{i \text{ист}}, \tilde{\tau}_{n \text{ист}} = \tilde{\tau}_{n \times 1}.$$

5. Моделируем реальное положение МРСДБ путем смещения истинной позиции в границах модели  $\tilde{q}_{2 \text{см}} = [x_{2 \text{см}}, y_{2 \text{см}}, z_{2 \text{см}}]$ .
6. Рассчитываем вектор опорных значений

$$\tau_{1 \text{см}}, \tau_{2 \text{см}}, \dots, \tau_{i \text{см}}, \tau_{n \text{см}} = \bar{\tau}_{n \times 1 \text{см}}$$

и невязку

$$\nabla \tilde{\tau}_{n \times 1} = \tilde{\tau}_{n \times 1} - \bar{\tau}_{n \times 1 \text{см}}.$$

7. Линеаризуем зависимость  $\tau = f(x, y, z)$ . Для этого построим частные производные от измеряемых параметров по искомым.

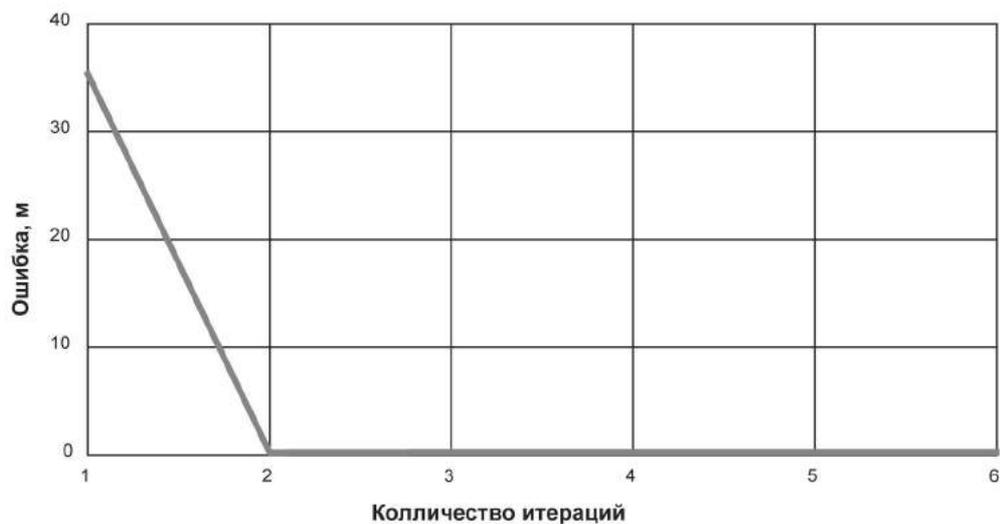


Рис. 2. Сходимость итерационного процесса местоопределения МРСДБ для квазара '0906+015',  $t_{\text{ит}}=120\text{с}$ ,  $\sigma = 10^{-15}$



Рис. 3. Сходимость итерационного процесса местоопределения МРСДБ для квазара '0906+015',  $t_{\text{ит}}=120\text{с}$ ,  $\sigma = 10^{-12}$

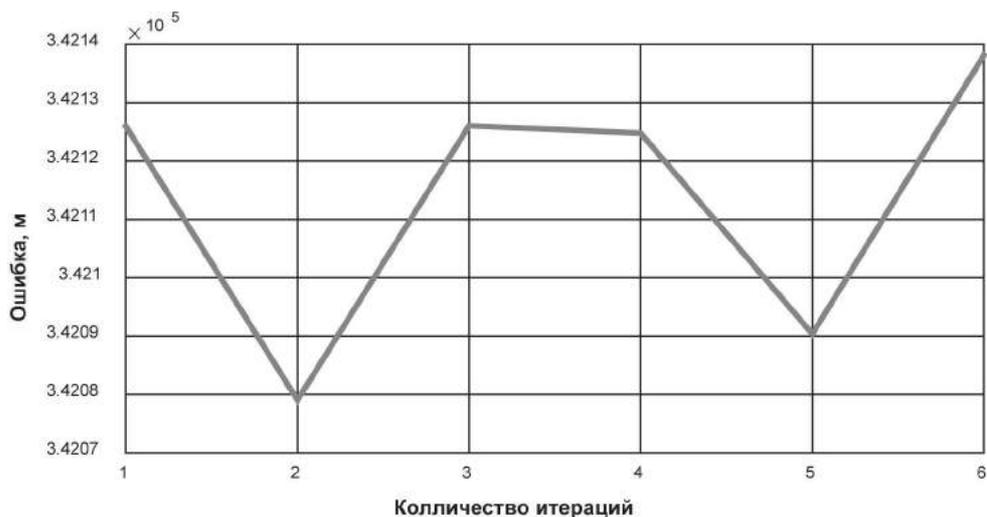


Рис. 4. Сходимость итерационного процесса местоопределения МРСДБ для квазара '1055+018',  $t_n=120c$ ,  $\sigma=10^{-9}$

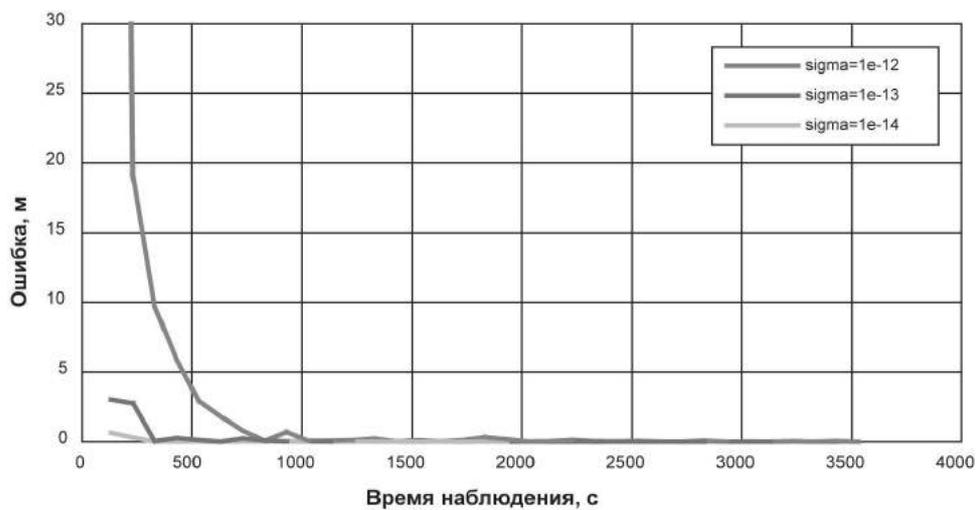


Рис. 5. Ошибка определения координат от времени наблюдения при разных значениях СКО шума

8. Возмущаем параметр  $x$ , добавляя  $\delta x$ . Получаем  $x + \delta x$ .

9. Далее рассчитываем значение  $\tau(x + \delta x)$ .

10. Для  $n$  измерений получим:

$$\tau_1(x + \delta x), \tau_2(x + \delta x), \dots, \tau_i(x + \delta x), \dots, \tau_n(x + \delta x).$$

11. Также рассчитываются невозмущенные значения задержки:

12. Находим частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_1}{\partial x} &= \frac{\Delta \tau_1(\delta x)}{\delta x} \\ \Delta \tau_1(\delta x) &= \tau_1(x + \delta x) - \tau_1(x) \\ \frac{\partial \tau_2}{\partial x} &= \frac{\Delta \tau_2(\delta x)}{\delta x} \\ \Delta \tau_2(\delta x) &= \tau_2(x + \delta x) - \tau_2(x) \\ &\vdots \\ \Delta \tau_i(\delta x) &= \tau_i(x + \delta x) - \tau_i(x) \\ &\vdots \\ \Delta \tau_n(\delta x) &= \tau_n(x + \delta x) - \tau_n(x) \\ \frac{\partial \tau_n}{\partial x} &= \frac{\Delta \tau_n(\delta x)}{\delta x} \end{aligned}$$

13. Составляем матрицу наблюдения  $A$  размерности  $[n \times 3]$ .

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tau_1}{\partial x} & \frac{\partial \tau_1}{\partial y} & \frac{\partial \tau_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_2}{\partial x} & \frac{\partial \tau_2}{\partial y} & \frac{\partial \tau_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \tau_i}{\partial x} & \frac{\partial \tau_i}{\partial y} & \frac{\partial \tau_i}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \tau_n}{\partial x} & \frac{\partial \tau_n}{\partial y} & \frac{\partial \tau_n}{\partial z} \end{bmatrix}.$$

15. Находим  $\nabla \bar{q}$  по формуле  $\nabla \bar{q} = (A^T A)^{-1} A^T \nabla \bar{\tau}$ . Этот процесс итерационный, т.к. в п. 7 зависимость  $\tau = f(x, y, z)$  была линеаризована. Поэтому коррекцию проводим по формуле  $\bar{q}_{2cm} = \bar{q}_{1cm} + \Delta \bar{q}_i$ , где  $i$  – номер итерации.

16. Для нового  $\bar{q}_{2cm}$  пересчитываем  $\bar{\tau}_{n \times 1cm}$  и матрицу частных производных  $A$ . И так, пока не будет выполняться условие  $|\Delta \bar{q}_{i+1}| > |\Delta \bar{q}_i|$ .

Точность решения характеризуется матрицей  $K_q = \sigma^2 (A^T A)^{-1}$ , где  $\sigma^2$  – дисперсия шума измерений.

Проведено моделирование процесса местопределения МРСДБ с использованием процедуры наименьших квадратов. Преимуществами данного метода являются простота и быстрота расчетов. Требуется всего 2–3 итерации для нахождения координат при наличии приемлемого геометрического фактора. На рис. 2 представлена зависимость ошибки местопределения МРСДБ для квазара '0906+015' при времени наблюдения  $t_n = 120$ с и воздействии шума с среднеквадратичным отклонением

(СКО)  $\sigma = 10^{-15}$ . Для этих исходных данных оценка по методу наименьших квадратов формируется уже на второй итерации.

На рис. 3 представлена зависимость ошибки местопределения МРСДБ для СКО шума  $\sigma = 10^{-12}$ . Для этих исходных данных оценка по методу наименьших квадратов формируется на третьей итерации, но с худшими параметрами.

Результаты моделирования показывают, что этот метод позволяет получить приемлемое по точности решение даже при наблюдении одного квазара на непродолжительных временных интервалах, но при малой интенсивности шума измерений. При увеличении СКО шума итерационный процесс поиска решения может расходиться. Так, для квазара 1055+018,  $t_n = 120$ с и  $\sigma = 10^{-9}$  решение задачи оказывается не удовлетворительным (рис. 4).

Таким образом, можно построить зависимость ошибки определения координат от времени наблюдения при разных значениях СКО шума. Результат представлен на рис. 5.

## Заключение

Разработана методика определения координат мобильной станции по РСДБ наблюдениям методом решения обратной задачи. Преимущества данной методики – простота и быстрота расчетов для ситуаций с хорошей наблюдаемостью. Результаты моделирования показывают: метод эффективен для значительных времен наблюдения и при малом шуме. При увеличении шума итерационный процесс решения задачи может расходиться. Решение проблемы возможно по пути прямого определения координат мобильной станции с помощью РСДБ-наблюдений на основе аппарата эмпирического поиска решения, что является направлением дальнейших исследований.

## Литература

1. Применение подвижных радиоинтерферометров с длинной базой для повышения устойчивости навигационно-временных определений / А.П. Алешкин [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 529–537.
2. Veron-Cetty, M. P. Catalogue of Quasars and Active Nuclei: 13-th Edition / M.P. Veron-Cetty, P.A. Veron // Astronomy & Astrophysics manuscript. – March 30, 2010.
3. Параметры земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ – М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2014. – 52 с.
4. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / А.А. Коростылев [и др.]; под ред. В.Е. Дулевича – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. Радио, 1978. – 608 с.
5. Основы радионавигационных измерений / В.А. Губин [и др.]. – МО СССР, 1987. – 430 с.
6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич [и др.]; под ред. В.С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

# Исследование радиационной стойкости малых космических аппаратов на солнечно-синхронной орбите

## A research of radiation firmness of small space vehicles in a sun-synchronous orbit

**Павленко / Pavlenko T.**

Татьяна Сергеевна

(t.pavlenko@scaegroup.com)

кандидат физико-математических наук.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
старший научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** радиационная стойкость – radiation resistance; поглощенная доза – absorbed dose; малые космические аппараты – small spacecraft; солнечно-синхронная орбита – sun-synchronous orbit; моделирование – modeling.

В статье проведен анализ влияния факторов космического пространства на работоспособность малых космических аппаратов, находящихся на солнечно-синхронной орбите. Рассмотрены вопросы защиты аппаратов от ионизирующего излучения, отражены факторы космического пространства и их влияние на внешнюю защиту, проведена оценка радиационной стойкости. Результатом работы являлось исследование и проверка путем математического моделирования стойкости к факторам космического пространства различных конструкций аппаратов.

The article analyzes the influence of space factors on the performance of the small spacecraft in the sun-synchronous orbit. Discussed the protection of devices from ionizing radiation are considered, factors of outer space and their influence on external protection are reflected, and radiation durability is estimated. The result of the work was the research and verification by mathematical modeling of the resistance to the factors of outer space of the various structures of the devices.

### Введение

Одним из наиболее перспективных направлений в проектировании и электронике является разработка малых космических аппаратов (КА). Невысокие весовые и габаритные размеры позволяют значительно снизить затраты на запуск таких КА. Использование малых космических аппаратов и наноспутников на низких (до 1500 км) солнечно-синхронных орбитах [1] позволяет значительно улучшать качество навигации морских объектов, выполнять задачи по дистанционному зондированию местности, экономия значительные ресурсы на запуске и разработке.

Однако в условиях импортозамещения использование зарубежных радиационно-стойких комплексу-

ющих накладывает ограничение на их применение в современных малых КА – наноспутниках (весом от 1 до 10 кг). Поэтому является актуальной задача оценки и прогнозирования радиационной стойкости внешней защиты (корпуса аппарата), препятствующей прохождению заряженных частиц космического пространства и защищающей электронные компоненты (ЭК) КА. Оценка дозовых эффектов и анализ прохождения заряженных частиц через вещество осуществлялись с помощью специализированных программных пакетов.

### Объект исследования и исследуемые параметры

Одной из перспективных орбит для запуска КА является солнечно-синхронная орбита. Особенностью солнечно-синхронной орбиты является то, что местное время суток пролета аппарата над каждым участком местности остается неизменным, также угол между направлением на Солнце и нормалью к плоскости орбиты практически постоянен. Это способствует созданию благоприятных условий для работы системы энергоснабжения, путем размещения плоскости орбиты таким образом, чтобы КА не попадал на неосвещенную сторону Земли.

Находясь в околоземном пространстве, космические аппараты испытывают влияние ионизирующего излучения (ИИ), которое представляет собой поток первичных заряженных частиц (электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы), и вторичных частиц – результата ядерных превращений, связанных с первичными частицами. В результате воздействия ИИ на бортовую радиоэлектронную аппаратуру вследствие ионизационных и ядерных потерь энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных элементах, наблюдаются различные сбои и отказы [2]. Для снижения риска воздействия ИИ на космический аппарат при проектировании необходим анализ конструкции КА.

В данной работе объектом исследования являлись малые КА весом 10 кг, корпуса которых выполнены в форме куба и шестиугольной призмы из алюминия-

евых сплавов, находящиеся на солнечно-синхронной орбите со следующими параметрами: 1) срок активного существования 5 лет; 2) наклонение  $70^\circ$ ; 3) перигей 800 км; 4) апогей 810 км. Размеры граней были выбраны 0,30 м и 0,40 м. Данный выбор обусловлен легкостью металла, его дешевизной, приемлемыми поглощающими способностями и доступностью. Для таких конфигураций была рассчитана масса корпуса из алюминия спутника для трех толщин корпуса: 1 мм, 2 мм, 3,5 мм.

В случае выбора для КА корпуса спутника в форме куба с гранью в 0,4 м и толщиной в 1 мм масса корпуса составит в среднем 26% от всего веса аппарата. В том случае, когда мы увеличиваем толщину корпуса до 2 мм, корпус будет вносить вклад в общую массу спутника на 52%, т.е. наблюдается увеличение на 26% по сравнению с первым случаем. При увеличении толщины до 3,5 мм, масса корпуса будет составлять уже 91%, в таком случае при переходе с 2 мм на 3,5 мм корпус становится тяжелее на 39%.

Если использовать корпус в форме куба с гранью в 0,3 м масса корпуса значительно снизится, что позволяет использовать толщину стенки в 3,5 мм. В таком

случае масса корпуса составит 51% от общей массы, что меньше, по сравнению с массой корпуса для толщины в 2 мм и гранью куба 0,4 м.

Использование корпуса в форме шестиугольной призмы и гранью в 0,4 м приводит к тому, что масса корпуса составит в среднем более 34% (для 1 мм), 68,5% (для 2 мм), 120% (для 3,5 мм). Это означает, что максимальной допустимой толщиной стенки корпуса будет 2 мм при массе в 6,85 кг.

Таким образом, одним из наиболее оптимальных вариантов корпуса для малого КА весом в среднем до 10 кг является использование корпуса из алюминия (алюминиевых сплавов) в форме шестиугольной призмы с гранью в 0,3 м, т.к. даже при максимальной толщине защиты – 3,5 мм, масса корпуса будет составлять 67%, что допустимо. Однако необходимо более точно подбирать состав комплектующих аппарата, масса которых не должна превышать требуемой массы. Если же требуется максимальная защита от внешних воздействующих факторов, тогда наилучшим вариантом будет использование корпуса из алюминия (алюминиевых сплавов) в форме куба с ребром в 0,3 м.

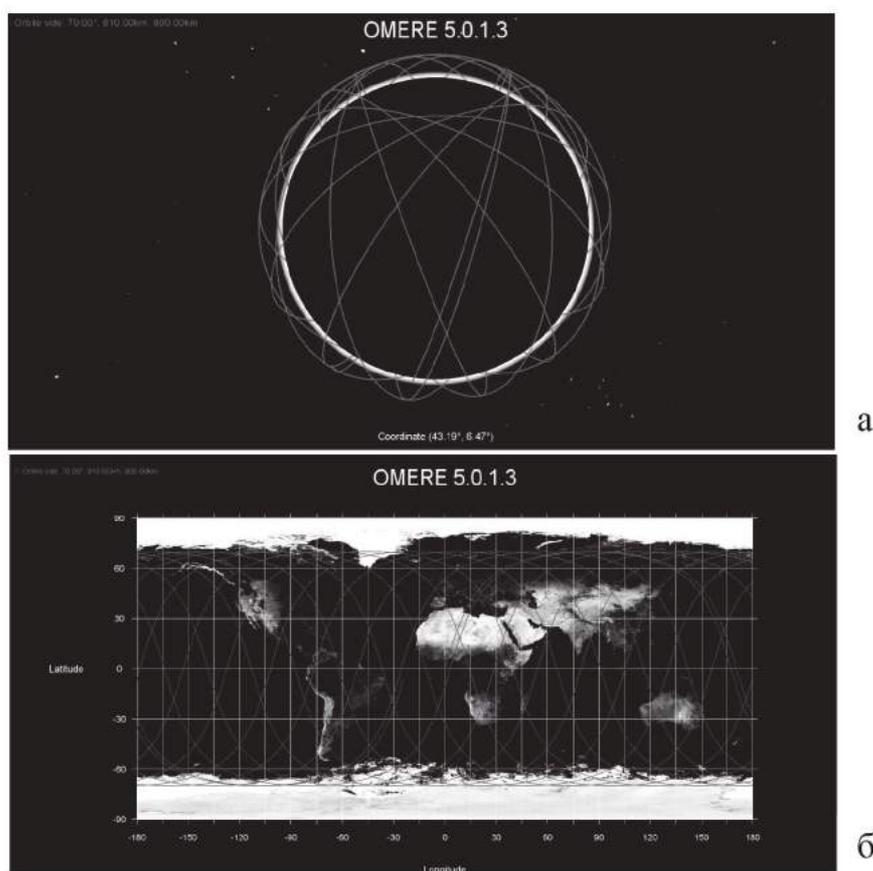


Рис. 1. Траектория полета КА (а – объемный вид, б – вид в горизонтальной плоскости Земли) на солнечно-синхронной орбите с исследуемыми параметрами

## Оценка радиационной стойкости

Оценка поглощенной дозы в зависимости от различных параметров орбиты и спутника – необходимая процедура при проектировании космического аппарата [2]. Полученные результаты позволяют определить наилучшие условия для эксплуатации спутника и увеличить его срок службы. Для анализа радиационной стойкости КА принималась суммарная допустимая поглощенная доза для электронных компонент не более 10 крад [2].

Оценка поглощенной дозы производилась с помощью программного пакета OMRE, предназначенным для расчетов воздействия космической радиации на КА.

Ионизационные потери ионов в пакете OMRE при энергии частиц свыше 2 МэВ/нуклон описываются формулой Бете-Блоха [2]:

$$\left(-\frac{dE}{dX}\right)_{ion} = \frac{4\pi Z_i^2 e^4}{m_0 e^2} NZ \left[ \ln\left(\frac{2m_0 v^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{c}{z} - \delta \right], \quad (1)$$

где  $Z_i$  – ядерный заряд налетающего иона;  $Z$  – ядерный заряд атомов среды;  $N$  – концентрация атомов в веществе;  $I \approx (10-13)$  – средний потенциал ионизации среды;  $c/z \approx 0,1-0,3$  – оболочечная поправка, учитывающая неполное участие электронов в торможении частицы;  $\delta$  – поправка, характеризующая поляризацию среды;  $m_0$  – масса покоя электрона;  $e$  – заряд электрона;  $v$  – скорость иона;  $\beta$  – отношение скорости иона к скорости света.

Для исследуемого КА с параметрами орбиты, указанными выше, на рис. 1 приведена рассчитанная траектория полета и получены зависимости поглощенной дозы от высоты орбиты, угла наклона и толщины корпуса аппарата.

Также были получены распределения частиц по энергиям в зависимости от высоты орбиты. В качестве задачи исследования необходимо было провести оценку поглощенной дозы КА в зависимости от высоты орбиты. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

На рис. 2 видно, что с ростом высоты орбиты поглощенная доза (следовательно, и влияние заряженных частиц) увеличивается с 12 крад до 1275 крад. Спад в зоне от 4 км до 7 км обусловлен тем, что аппарат попадает в область между магнитными поясами земли. В этом промежутке поглощенная доза снижается (1275 крад – 837 крад). Когда объект приближается к внешнему магнитному поясу, то снова начинается рост поглощенной дозы. Так как рассматриваемый космический аппарат выводится на солнечно-синхронную орбиту, то с точки зрения дозовых нагрузок интересует участок в диапазоне высот 500–1500 км. Полученные результаты позволяют провести оценку, на каком расстоянии от Земли воздействие заряженных частиц на аппарат максимально, что позволит при проектировании КА учитывать выбор формы, конструкции и расположение

элементов, позволяющие максимально снизить влияние внешних воздействующих факторов и увеличить время работы спутника.

При проектировании КА угол наклона выбирается исходя из задач работы аппарата. Однако выбор угла наклона может сказываться на накопленную дозу. Для оценки влияния угла наклона на накопленную дозу проведена оценка поглощенной дозы КА с рассматриваемыми параметрами орбиты. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Как видно из полученных данных, с ростом угла наклона заметно и увеличение поглощенной дозы с 2,7 до 29 крад. Когда спутник попадает в область "полярных сияний" снижается и влияние заряженных частиц с 29 крад до 22 крад, при выходе из зоны накопленная доза вновь начинает увеличиваться.

## Моделирование прохождения протонов через защиту космического аппарата

При проектировании КА с целью оценки влияния прохождения заряженных частиц рассматривались следующие параметры: корпус аппарата различной толщины; влияние расположения аккумуляторных батарей на внутренней стороне корпуса; влияние расположения солнечных панелей на внешней стороне корпуса. В соответствии с рассматриваемыми условиями было получено распределение протонов по энергиям от 0,1 до 300 МэВ для высот в диапазоне 550–950 км и различных толщин корпусов аппарата. Моделирование прохождения частиц через элементы аппарата производилось для алюминиевого корпуса толщиной 1–3,5 мм с помощью программного пакета SRIM. Комплекс SRIM – группа программ, предназначенных для моделирования движения ионов в веществе с помощью квантово-механического рассмотрения ионно-атомных столкновений. Вычисления являются очень эффективными благодаря использованию статистических алгоритмов, в которых ионы могут совершать «прыжки» между расчетными столкновениями. Для описания процесса упругого рассеяния ионов на атомах мишени используется соотношение:

$$\cos\left(\frac{Q}{2}\right) = \frac{r+p+d}{r+r_0}, \quad (2)$$

где,  $Q$  – угол рассеяния налетающей частицы  $r = r_1 + r_2$ ;  $d = d_1 + d_2$ ;  $r_1, r_2$  – радиусы кривизны траекторий;  $d_1, d_2$  – небольшие поправочные параметры;  $p$  – прицельный параметр;  $r_0$  – расстояние ближайшего сближения.

В качестве примеров приведены случаи взаимодействия частиц с энергией в 12 МэВ и материала корпуса спутника. По результатам моделирования установлено, что корпус толщиной в 1 мм поглощает 91,1% от всего потока частиц, 2 мм – 92,7%; 3,5 мм – 94,2 мм. С ростом высоты доля поглощенного ионизирующего

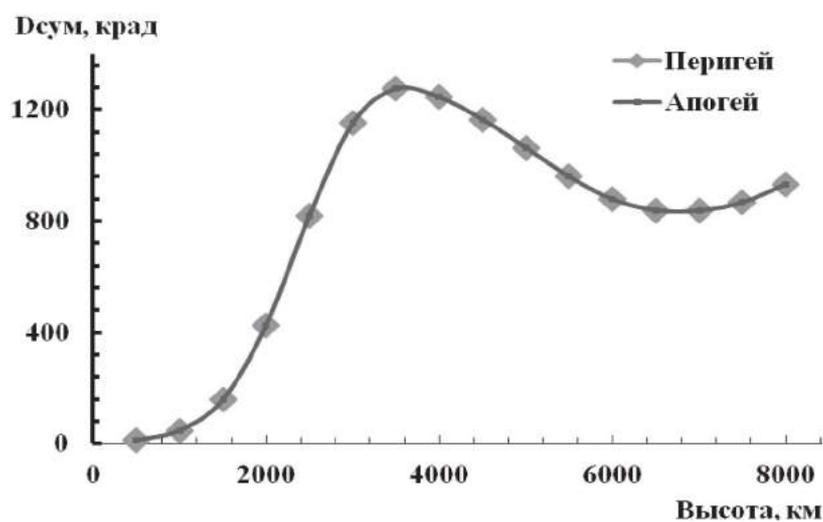


Рис. 2. Зависимость суммарной поглощенной дозы от высоты орбиты

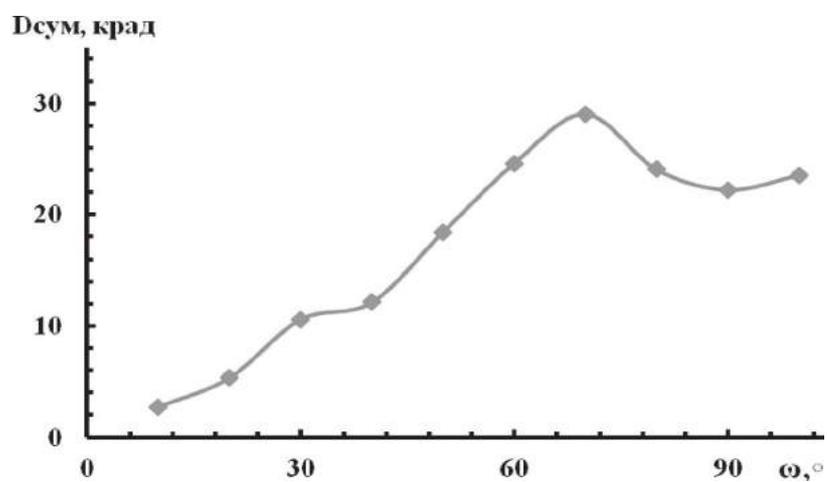


Рис. 3. Зависимость суммарной поглощенной дозы от угла наклонения  $\omega$

излучения снижается – на каждые 100 км уменьшение примерно на 0,1 %. При моделировании рассматривался процесс прохождения частиц в веществе в горизонтальной плоскости, как наиболее "худший случай" при взаимодействии частиц с КА. Процесс прохождения протонов с энергией 12 МэВ через корпус толщиной 2 мм представлен на рис. 4.

При прохождении протонов с энергией 12 МэВ через алюминиевый корпус в 2 мм видно, что частицы при соударении частично теряют энергию и отклоняются от траектории движения. Некоторая доля частиц отклоняется значительно и проходит путь в веществе до полной остановки под большим (более 30°) углом относительно траектории полета.

Также наблюдается при прохождении частиц в веществе "пролет в обратном направлении" от траектории. Такое движение частиц обнаружено уже после значительной доли прошедших и остановившихся частиц, вызвавших образование дефектов в металлической

структуре корпуса КА. Как видно из представленных результатов, основная доля прошедших частиц не доходит до середины образца и останавливается.

Прохождение протонов с энергией 12 МэВ через корпус толщиной в 3,5 мм приведено на рис. 5. Как видно из представленных результатов, налетающие частицы полностью задерживаются материалом корпуса.

Случай прохождения протонов с энергией 15 МэВ через алюминиевый корпус толщиной в 2 мм и расположением аккумуляторных батарей на внутренней стороне представлен на рис. 6. При моделировании батарея рассматривалась в виде трех слоев: внешние – две алюминиевые пластины толщиной 0,5 мм, в качестве аккумулирующего вещества был взят слой углерода толщиной 4 мм, поскольку плотность наполнителя близка к плотности углерода. Как видно из рис. 6, основная доля частиц задерживается слоем корпуса КА и не доходит до батареи. По результатам моделирования установлено, что при таком расположении аккумуля-

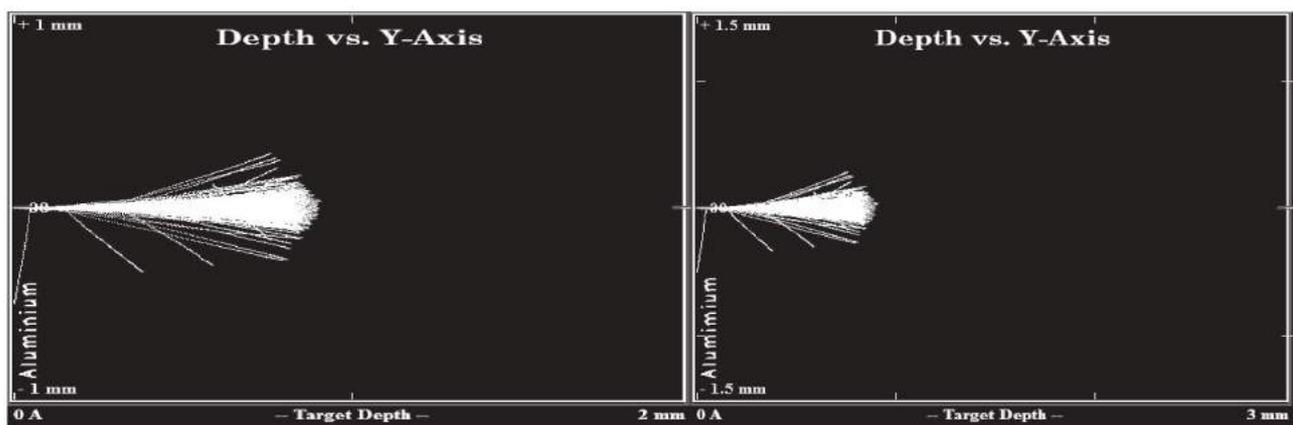


Рис. 4. Прохождение протонов с энергией 12 МэВ через корпус толщиной в 2 мм

Рис. 5. Прохождение протонов с энергией 12 МэВ через корпус толщиной в 3,5 мм

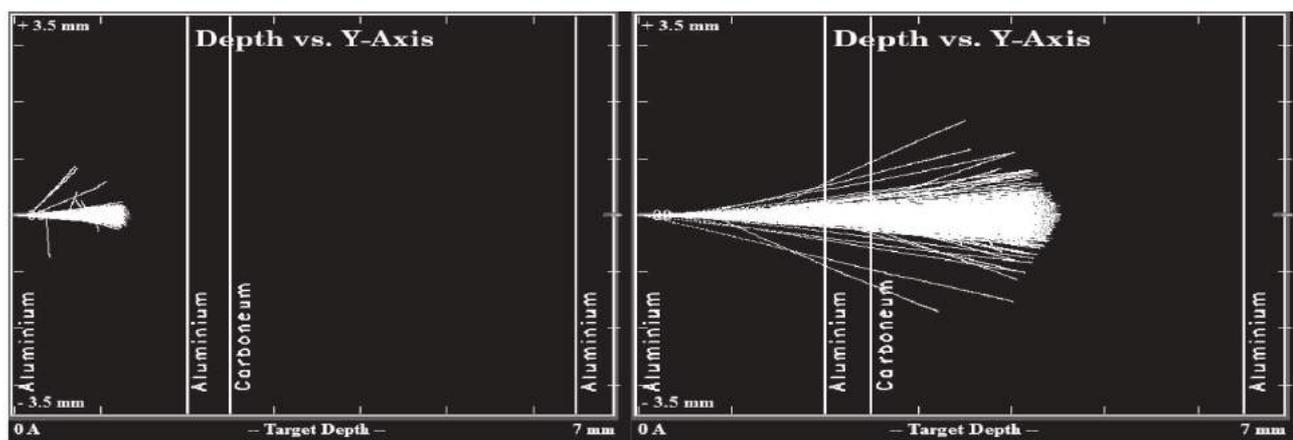


Рис. 6. Прохождение протонов с энергией 15 МэВ через защиту толщиной в 2 мм и аккумулятор

Рис. 7. Прохождение протонов с энергией 30 МэВ через защиту толщиной в 2 мм и аккумулятор

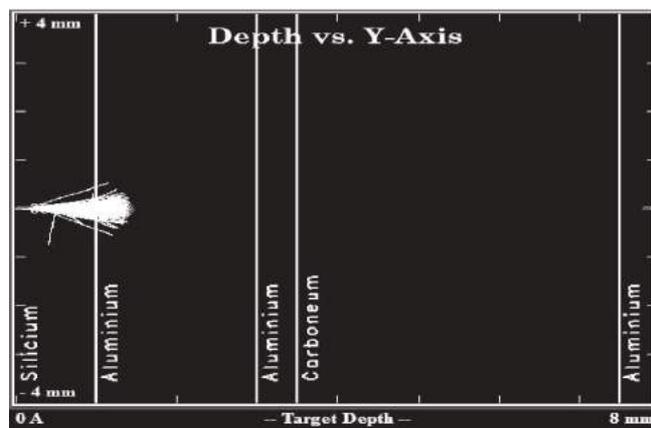


Рис. 8. Прохождение протонов с энергией 15 МэВ через защиту толщиной в 2 мм, аккумулятор и солнечную батарею

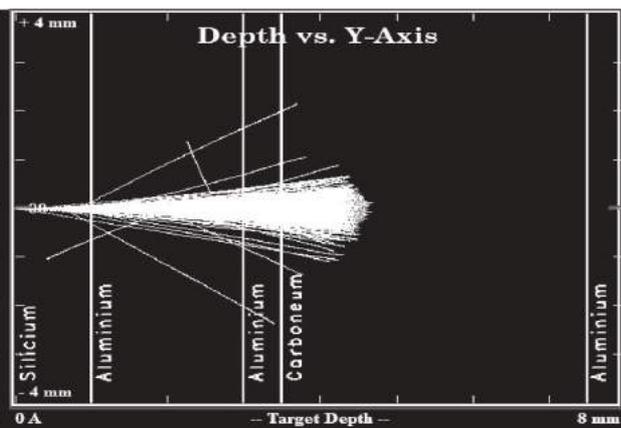


Рис. 9. Прохождение протонов с энергией 30 МэВ через защиту толщиной в 2 мм, аккумулятор и солнечную батарею

муляторных батарей конструкция поглощает до 95,5% от полного спектра частиц. С ростом высоты орбиты доля поглощенного излучения снижается. Частицы с энергией ниже 35 МэВ поглощаются.

Прохождение протонов с энергией 30 МэВ через корпус толщиной в 2 мм и аккумулятор приведено на рис. 7.

По результатам моделирования установлено, что частицы проходят через два слоя алюминия, достигают аккумулятора и задерживаются в нем. Накопленные аккумулятором частицы также могут вызывать структурные повреждения. Однако такая конструкция позволяет защитить комплектующие с активными элементами, отвечающими за функционирование (выполнение основных задач) КА. По результатам моделирования прохождения протонов с энергией 100 МэВ через корпус толщиной в 2 мм и аккумулятор установлено, что высокоэнергетичные протоны практически беспрепятственно проходят через элементы аппарата через все элементы.

Как видно из представленных результатов моделирования, высокоэнергетичные частицы без особого препятствия проникают через все элементы КА и могут стать причиной одиночных сбоев и отказов электронных компонент. Поэтому при проектировании конструкции необходимо учитывать и долю высокоэнергетичных частиц на заданных орбитах и расположение элементов внутри спутника.

Результаты моделирования прохождения протонов через элементы КА при расположении солнечных батарей на внешней стороне корпуса приведены на рис. 8, 9.

В данном случае установлено, что поглощается до 96,3% от всего спектра, с ростом высоты на каждые 100 км прошедшая доля будет увеличиваться на 0,1%. По результатам оценки установлено, что такая конструкция аппарата позволила добиться защиты от прохождения частиц с энергиями до 40 МэВ (рис. 9). По результатам моделирования прохождения протонов с энергией 100

МэВ через корпус толщиной в 2 мм, аккумулятор и солнечную батарею установлено, что высокоэнергетичные протоны практически беспрепятственно проходят через элементы аппарата через все элементы. Поэтому необходимо продумывать различные варианты защиты именно от высокоэнергетичных частиц.

### Заключение

Таким образом, были исследованы дозовые нагрузки на малый космический аппарат в зависимости от различных параметров орбиты. Также были исследованы конструкции корпуса спутника и толщина защиты (корпус аппарата), которая способна обеспечить функциональность в течение всего срока службы. На основании проведенного анализа, можно сделать вывод, что наилучшим выбором формы корпуса является куб, который обеспечивает минимальный вес корпуса аппарата. Одним из оптимальных решений при выборе толщины корпуса является толщина не менее 2 мм, что позволяет обеспечить приемлемую радиационную стойкость в совокупности с невысокой массой спутника.

Исследованные закономерности поглощенной дозы КА, параметров орбиты и комплектации элементов аппарата свидетельствуют о том, что необходимо при проектировании учитывать как параметры орбиты выводимых спутников, так и толщину, форму и расположение элементов аппаратов, увеличивая их срок службы.

### Литература

1. Акимов, А. А. Солнечно-синхронные орбиты – основные возможности и перспективы / А.А. Акимов, А.А. Гриценко, Р.Н. Юрьев // Инфосфера. – 2015. – № 68. – С. 18–20.
2. Новиков, Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов / Л.С. Новиков. – Москва: Университетская книга, 2010. – 192 с.

## Метрологическое обеспечение испытаний космических аппаратов проекта «Луна-Глоб»

### Metrological maintain of Luna-Glob space vehicles testing

#### Клюшев / Klyushev P.

Павел Владимирович  
(pavel.klyushev@scaegroup.com)  
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,  
ведущий инженер по метрологии.  
г. Санкт-Петербург

#### Янковский / Yankovsky A.

Александр Анатольевич  
(dep253@vniim.ru)  
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский  
институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
руководитель отдела.  
г. Санкт-Петербург

#### Алфёров / Alferov I.

Игорь Николаевич  
(alferov@laspace.ru)  
АО «НПО Лавочкина»,  
начальник отдела.  
г. Химки, Московская область

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение – measurement system; методика измерений – measurement technique; передача размера единицы физической величины – systems of metrological assurance; проект «Луна-Глоб» – the project "Luna-Glob".

В статье рассмотрены мероприятия метрологического обеспечения испытаний макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб». Согласно Федеральной космической программы Российской Федерации на 2016–2025 годы, проект «Луна-Глоб» станет продолжением отечественных лунных миссий. Цель проекта – запуск автоматического зонда для исследований в районе Южного полюса Луны.

The article considers the activities of metrological assurance of tests of models of the spacecraft of the project "Luna-Glob". According to the Federal space program "Luna-Glob" will be a continuation of the domestic lunar missions. The project aims to launch robotic probes to research in the area of the South pole of the moon.

#### Введение

В 2017 году предприятиями АО «НПО Лавочкина» и АО «НЦ ПЭ» совместно с ведущей организацией Росстандарта ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» была проведена работа, направленная на развитие метрологического обеспечения испытаний макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб».

Основной целью проведения работ по метрологическому обеспечению испытаний макетов космических аппаратов (далее – КА) проекта «Луна-Глоб» являлась

аттестация стенда для отработки динамики посадки на натурном макете с обезвешиванием (далее – СОДП) и стенда для отработки мягкой посадки на динамически подобной модели (далее – СОМП).

Для выполнения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

– был проведен ряд фундаментальных и прикладных исследований по передаче размера единицы физической величины от государственного первичного эталона ГЭТ-94-2001 «Государственный первичный эталон единиц линейного ускорения и плоского угла при угловом перемещении твердого тела» к комплексу средств измерений (далее – комплект СИ), используемых для получения значения мгновенной скорости макетов космических аппаратов;

– на основе экспериментальных исследований разработана и аттестована методика измерений мгновенной скорости макетов космических аппаратов МВИ 18/001-2017 в соответствии с «Порядком аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений, методик (методов) измерений и их применения», утвержденным приказом Минпромторга РФ от 15.12.2015 № 4091;

– в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 0008-002 была проведена аттестация стенда для отработки динамики посадки на натурном макете с обезвешиванием и стенда для отработки мягкой посадки на динамически подобной модели.

#### Аттестация методики измерений

В соответствии с требованиями Федерального закона от 26 июня 2008 года №102-ФЗ «Об обеспечении единства

измерений», ГОСТ РВ 0008-002 комплект СИ, используемый для аттестации СОДП и СОМП, должен был быть внесен в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений и иметь действующее свидетельство об утверждении типа СИ, а методики (методы) измерений аттестованы в порядке, установленном действующим законодательством РФ в области обеспечения единства измерений.

Для подтверждения ряда характеристик СОДП и СОМП были выполнены прямые измерения с применением средств измерений утвержденного типа.

Однако для подтверждения одного из условий испытаний потребовалась проверка значения вертикальной составляющей скорости  $V_v$  в момент первого касания опоры макета СОДП (обезвешенного) о поверхность грунта, а также значения вертикальной составляющей скорости  $V_v$  и горизонтальной составляющей скорости  $V_g$  в момент первого касания опоры СОМП.

Анализ измерительной задачи показал, что к началу испытаний отсутствовали средства измерения, включенные в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений РФ, позволяющие выполнить измерения мгновенной скорости макета КА.

Метрологической службой АО «НЦ ПЭ» было принято решение о разработке комплекта СИ в совокупности с методикой измерения (далее – МВИ), используемого для получения значения мгновенной скорости макетов космических аппаратов, который включал в себя:

- систему лазерную координатно-измерительную Leica Absolute Tracker AT960;
- генератор импульсов Г5-56.

Системы лазерные координатно-измерительные Leica Absolute Tracker AT960 способны выполнять измерение координат визирной цели с частотой 1000 Гц, что делает возможным измерение пространственных характеристик объектов и явлений в динамике.

Использование специализированной визирной цели Leica T-Mac, содержащей, помимо трипельпризменного отражателя, сеть инфракрасных светодиодов, позволило в результате одного измерения определять, помимо декартовых координат визирной цели, углы поворота цели относительно осей выбранной рабочей системы координат.

Дополнительной функцией Leica Absolute Tracker AT960 является точное определение моментов времени измерений в единой системе отсчета времени – меток времени, с погрешностью не более  $\pm 5$  мкс. Отсчет времени производится с применением встроенного в контроллер Leica Absolute Tracker AT960 источника опорного сигнала с известной частотой – кварцевого генератора. Также существует возможность подключения и использования внешнего источника опорной частоты для синхронизации измерений с внешним процессом и отсчета времени во внешней системе. Для данной измерительной системы в качестве внешнего источника опорной частоты использовался генератор импульсов Г5-56.

Таким образом, для любого  $i$ -го измерения известны 7 параметров: декартовы координаты  $X_i, Y_i, Z_i$  углы Эйлера  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  в момент времени измерений  $t_i$ .

Непрерывные измерения визирной цели, закрепленной на движущемся объекте, с частотой 1000 Гц формируют

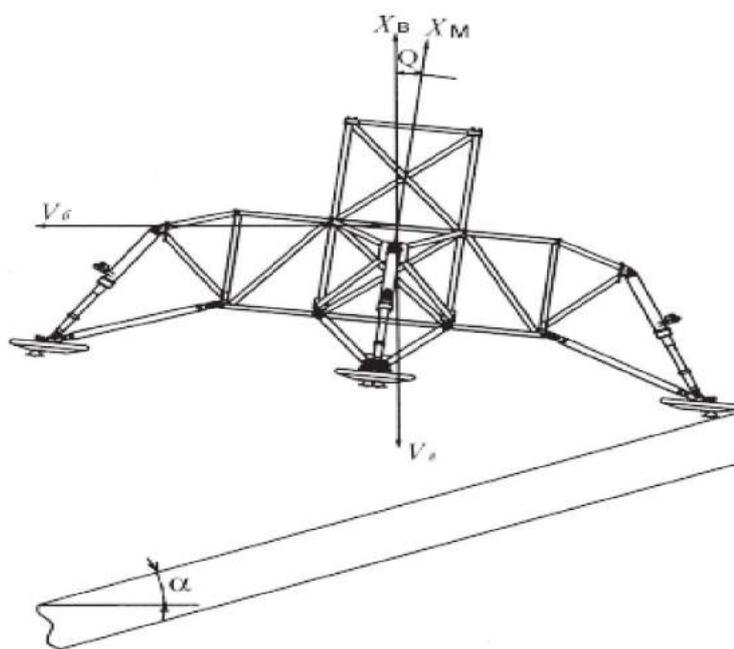


Рис. 1. Общий вид макета космических аппаратов проекта «Луна-Глоб»

в координатном пространстве траекторию перемещения объекта, представленную в виде набора точек.

Для каждого отрезка между точками  $P_i$  и  $P_{i+1}$  с метками времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$  возможно вычисление линейной скорости по формуле:

$$V = \frac{\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2}}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

Системы лазерные координатно-измерительные Leica Absolute Tracker AT960 внесены в Государственный Реестр Средств измерений как средство измерения статических пространственных характеристик – декартовых координат через измерение горизонтального, вертикального направлений и наклонного расстояния.

Подтверждение метрологических характеристик при определении мгновенной скорости КА указанным выше способом потребовало проведения испытаний с применением динамического эталона, с обязательным обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам РФ.

Данные испытания с целью аттестации методики измерений МВИ 18/001-2017 были проведены в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» по передаче размера единицы физической величины от государственного

первичного эталона ГЭТ-94-2001 «Государственный первичный эталон единиц линейного ускорения и плоского угла при угловом перемещении твердого тела» к комплексу СИ макетов космических аппаратов.

ГЭТ-94-2001 представляет собой центрифугу, период обращения которой известен с погрешностью  $10^{-4}$  с. Зная период обращения  $T$ , возможно вычислить угловую скорость  $\omega$  перемещения всех точек на плече центрифуги.

В случае если радиус окружности  $R$ , по которой перемещается точка, известен, то возможно вычисление линейной скорости точки с относительной погрешностью не более  $\pm 0,1\%$ .

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

$$V = R \cdot \omega \quad (3)$$

Установка на плечо центрифуги визирной цели и выполнение измерений ее координат в процессе вращения позволяет вычислить фактическую линейную скорость и провести оценку точности данного метода.

Измерения при экспериментальной апробации методики измерений проводились для двух ориен-

Таблица 1

Математическая модель МВИ 18/001-2017

№ п/п	Диапазон расчетной скорости $\bar{v}$ , м/с	Допустимая абсолютная погрешность измерения, м/с	Расчетное значение $t$ , с	Максимальная расчетная абсолютная погрешность измерения, м/с
1	2	3	4	5
1	от 0 до 1 вкл.	0,015	0,010	0,001
2	от 1 до 2 вкл.	0,030	0,010	0,002
3	от 2 до 3 вкл.	0,045	0,008	0,004
4	от 3 до 4 вкл.	0,060	0,008	0,005
5	от 4 до 5 вкл.	0,075	0,006	0,008
6	от 5 до 6 вкл.	0,090	0,006	0,010
7	от 6 до 7 вкл.	0,105	0,004	0,015
8	от 7 до 8 вкл.	0,120	0,004	0,020
9	от 8 до 9 вкл.	0,135	0,002	0,045
10	от 9 до 10 вкл.	0,150	0,002	0,050

Таблица 2

Экспериментальные данные аэробации МВИ 18/001-2017

№ п/ п	Показания эталонной установки ГЭТ 94-2001				Показания Leica Absolute Tracker AT960			Абсолютная погрешность измерения, м/с
	Количество оборотов, об/мин	Фактический период обращения, с	Радиус (расстояние от центра эталонной установки до центра отражателя), м	Расчетная мгновенная скорость, м/с	Временной интервал, пройденного пути, с	Путь (длина отрезка пройденного за временной интервал), м	Расчетная мгновенная скорость, м/с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	3	20,0040	0,746428	<b>0,234</b>	0,002	0,000468	<b>0,234</b>	<b>0,000</b>
	3	20,0040	0,746428	<b>0,234</b>	0,010	0,002330	<b>0,233</b>	<b>0,001</b>
2.	30	2,0004	0,746428	<b>2,344</b>	0,002	0,004686	<b>2,343</b>	<b>0,001</b>
	30	2,0004	0,746428	<b>2,344</b>	0,010	0,023440	<b>2,344</b>	<b>0,000</b>
3.	40	1,5003	0,746428	<b>3,126</b>	0,002	0,006250	<b>3,125</b>	<b>0,001</b>
	40	1,5003	0,746428	<b>3,126</b>	0,010	0,031260	<b>3,126</b>	<b>0,000</b>
4.	50	1,2002	0,746428	<b>3,908</b>	0,002	0,007818	<b>3,909</b>	<b>0,001</b>
	50	1,2002	0,746428	<b>3,908</b>	0,010	0,039050	<b>3,905</b>	<b>0,003</b>
5.	60	1,0002	0,746428	<b>4,689</b>	0,002	0,009372	<b>4,686</b>	<b>0,003</b>
	60	1,0002	0,746428	<b>4,689</b>	0,010	0,046880	<b>4,688</b>	<b>0,001</b>
6.	70	0,8573	0,746428	<b>5,471</b>	0,002	0,010926	<b>5,463</b>	<b>0,008</b>
	70	0,8573	0,746428	<b>5,471</b>	0,010	0,054710	<b>5,471</b>	<b>0,000</b>
7.	80	0,7502	0,746428	<b>6,252</b>	0,002	0,012504	<b>6,252</b>	<b>0,000</b>
	80	0,7502	0,746428	<b>6,252</b>	0,010	0,062530	<b>6,253</b>	<b>0,001</b>
8.	95	0,6317	0,746428	<b>7,423</b>	0,002	0,014842	<b>7,421</b>	<b>0,002</b>
	95	0,6317	0,746428	<b>7,423</b>	0,010	0,074200	<b>7,420</b>	<b>0,003</b>
9.	105	0,5715	0,746428	<b>8,206</b>	0,002	0,016412	<b>8,206</b>	<b>0,000</b>
	105	0,5715	0,746428	<b>8,206</b>	0,010	0,082030	<b>8,203</b>	<b>0,003</b>

таций Leica Absolute Tracker AT960 над плоскостью вращения центрифуги – под углом  $19^\circ$  и  $90^\circ$  с использованием двух видов отражателей (трипельпризменные и шестиосевые). Линейные скорости вращения при этом составили от 0,20 м/с до 9,62 м/с.

Для каждого цикла измерений для выбранной линейной скорости, результаты измерений сохранялись на протяжении минимум 10 оборотов центрифуги.

В процессе обработки результатов фактическая линейная скорость вычислялась для дуг окружности, опирающихся на угловые сектора в  $360^\circ$  (полный оборот),  $180^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $1^\circ$ , а также для дуг окружности, опирающихся на угол, равный  $(\varphi_{i+1} - \varphi_i)$  – разницы координат в цилиндрической системе для двух последовательных измерений  $i$  и  $i+1$ .

$$V = \frac{R \cdot (\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (4)$$

Перед проведением экспериментальной апробации методики измерений был произведен математический расчет абсолютной погрешности результата измерения мгновенной скорости макета космического, пользуясь формулой в соответствии с требованиями [4]:

$$\Delta v = \frac{s \cdot \Delta t + \Delta s \cdot t}{t^2} \quad (5)$$

где  $\Delta s$  – предел допускаемой абсолютной погрешности измерения Leica Absolute Tracker AT960, м;

$\Delta t$  – предел допускаемой абсолютной погрешности установки длительности основных импульсов генератора, с;

$s$  – длина пути (проекция вектора), пройденного объектом за временной интервал  $t$ , м;

$t$  – временной интервал от 0,001 до 0,010 с.

Результаты математического расчета максимальной абсолютной погрешности измерения по МВИ 18/001-2017 в таблице 1.

На основе экспериментальных исследований была разработана и аттестована методика измерения мгновенной скорости макетов космических аппаратов МВИ 18/001-2017 в соответствии с «Порядком аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений, методик (методов) измерений и их применения», утвержденным приказом Минпромторга РФ от 15.12.2015 № 4091.

Экспериментальные данные апробации МВИ 18/001-2017 приведены в таблице 2.

Примечание – Экспериментальные данные апробации МВИ 18/001-2017 представлены только для шестиосевого отражателя, входящего в Leica Absolute Tracker AT960.

В процессе оценки точности, была вычислена СКО измерения линейной скорости для различных эталонных скоростей (трипельпризменные отражатели).

График зависимости СКО измерения скорости в зависимости от скорости представлен на рис. 2.

Анализ экспериментальных данных и результатов математического расчета показал, что МВИ 18/001-2017 позволяет выполнить измерения при аттестации СОДП и СОМП с относительной погрешностью измерений мгновенной скорости не превышающей  $\pm 1,5\%$ , что удовлетворяет требованиям технической документации по метрологическому обеспечению испытаний космических аппаратов проекта «Луна-Глоб».

### Аттестация СОДП и СОМП

В ходе проведения доводочных и предварительных испытаний СОДП и СОМП на территории АО «НПО Лавочкина» была выполнена работа по аттестации



Рис. 2. График зависимости СКО измерения скорости от скорости

СОДП и СОМП в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 0008-002, ГОСТ Р 8.568 силами и средствами АО «НЦ ПЭ», ФГУП «ВНИИМ им Д. И. Менделеева».

Основной целью аттестации стендов СОДП и СОМП являлось подтверждение характеристик стендов и возможности воспроизведения условий испытаний в заданных пределах с допускаемыми отклонениями, а также установление годности использования стендов для испытаний посадочного устройства макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб».

## Заключение

Сопоставив полученные результаты проведения работ по аттестации СОДП и СОМП с начальными целями, можно выделить следующее:

– экспериментальная апробация методики измерений мгновенной скорости макетов КА проекта «Луна-Глоб» полностью подтвердила результаты математических расчетов ожидаемых метрологических характеристик, удовлетворяющих требованиям технической документации по метрологическому обеспечению испытаний СОДП и СОМП.

– разработанный комплект СИ и МВИ 18/001-2017 имеет практическое применение в дальнейших работах по метрологическому обеспечению изделий ракетно-космической отрасли.

В настоящее время АО «НЦ ПЭ» продолжает работы, направленные на создание и развитие средств метрологического обеспечения продукции ракетно-космической промышленности на различных этапах жизненного цикла.

## Литература

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 года №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями на 13 июля 2015 года).
2. ГОСТ РВ 0008-002-2013. ГСИ. Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции. Организация и порядок проведения.
3. ГОСТ Р 8.568-97. ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
4. МИ 1317-2004. ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

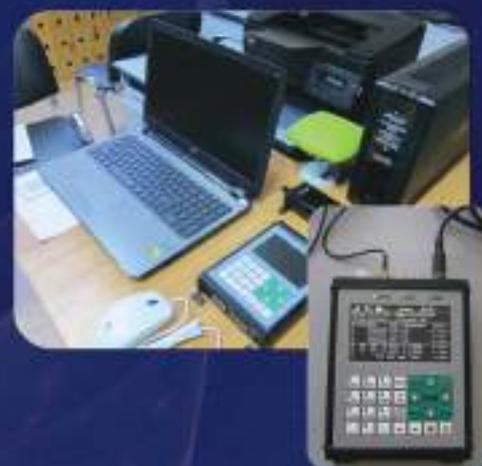
# Акционерное общество «Научный центр прикладной электродинамики»



## Геодезическая спутниковая аппаратура

### Геодезическая спутниковая аппаратура обеспечивает:

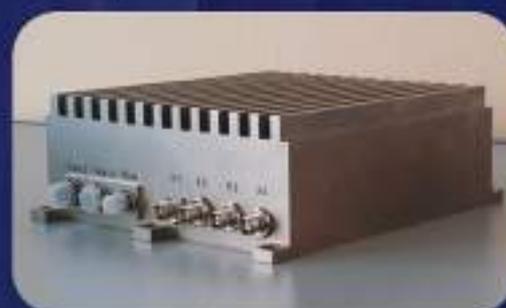
- поиск сигналов, слежение за их параметрами и оценку уровней отношений сигнал/шум, реализуемых при их приеме;
- измерение и регистрацию дальностей и фаз несущих частот сигналов;
- прием и распаковку навигационных сообщений, выделение цифровой информации и меток бортовой шкалы времени;
- определение координат фазового центра антенны в режиме абсолютных определений по измерениям, полученным на заданных сеансах наблюдений, и оценку точности их определения;
- реализацию по выбору оператора режимов работы, предусматривающих получение измерений при работе по разным сигналам;
- формирование и выдачу секундных меток времени в виде импульсов;
- формирование и регистрацию полученной информации;
- функционирование блока ПУ от внешнего опорного генератора, формирующего синусоидальный сигнал;
- расчет углов возвышения и азимутов направления на рабочие НКА;
- ввод оператором параметров и режимов работы блока ПУ (рабочая/ рабочие ГНСС, система координат, шкала времени, типы используемых сигналов, минимально допустимый угол возвышения НКА, временные границы сеанса измерений, дискретность регистрации, использование сигнала внешнего опорного генератора);
- индикацию на дисплее блока ПУ навигационно-временной информации, параметров и режимов работы блока ПУ.



## Бортовая приемо-измерительная аппаратура автономного высокоточного навигационно-временного обеспечения (БА НВО)

Разрабатываемый экспериментальный образец БА НВО предназначен для отработки технологических решений, обеспечивающих повышение точности местопредопределения космических аппаратов (КА) за счет совместного использования гражданских сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) в ГЛОНАСС, GPS, Galileo, сети земных опорных станций (ЗОС) нового поколения, а также информации целостности (ИЦ) и корректирующей информации, передаваемой в диапазоне L1 в составе сигналов космических аппаратов российской системы функциональных дополнений.

Новизна разрабатываемой аппаратуры состоит в совместном использовании космических и наземных источников радионавигационных сигналов и корректирующей навигационной информации, что позволит существенно улучшить точность навигационных определений космических объектов.



# Акционерное общество «Научный центр прикладной электродинамики»



## Сверхширокополосный автоматизированный комплекс радиомониторинга и пеленгации наземных радиозлектронных средств

Предназначен для пеленгования наземных источников радиоизлучения независимо от вида модуляции в широком диапазоне частот.

Аппаратура пеленгатора обеспечивает передачу и отображение данных о параметрах излучений и пеленге на источник излучения, а также доступ к информации о состоянии и параметрах пеленгатора по оптоволоконной линии связи.

### Комплекс обеспечивает решение следующих задач:

- автоматический радиомониторинг наземных радиозлектронных средств в поддиапазонах 0,2 - 22,0 ГГц;
- цифровая обработка принимаемых сигналов с автоматическим определением их основных параметров:
  - а) центральная частота принимаемых сигналов;
  - б) ширина спектра принимаемых сигналов;
  - в) плотность потока мощности принимаемых сигналов;
  - г) пеленг на источник излучения;
- сбор, обработку и передачу в базу данных электромагнитной обстановки (БД ЭМО) результатов цифровой обработки принимаемых сигналов и их основных параметров.



## Антенный приемный блок

### Назначение блока:

- прием СВЧ-сигналов в S диапазоне рабочих частот на 64 двухполяризационных излучателях по двум взаимно ортогональным поляризациям;
- сектор сканирования  $\pm 50^\circ$ ;
- фильтрация, усиление и аналоговое формирование диаграммы направленности на прием по двум поляризациям в соответствии с командами функционального управления;
- синфазное суммирование 64-х приемных сигналов отдельно по двум поляризациям;
- прием и выполнение команд функционального и технического управления, формирование и передача сообщений о техническом состоянии по интерфейсу LVDS;
- проведение встроенного технического контроля своей работоспособности;
- масса с теплоотводящим корпусом 13 кг.



# Концепция интеллектуального мониторинга технических систем с компенсацией негативных факторов процесса передачи и приема информации

## The concept of intellectual monitoring of technical systems with compensating of negative factors of process of transmission and information reception

### Шмелев / Shmelev V.

Валентин Валерьевич

(valja1978@yandex.ru)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ,

заместитель начальника кафедры технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств.

г. Санкт-Петербург

### Аванесов / Avanesov M.

Михаил Юрьевич

(avanesov@itain.ru)

кандидат технических наук.

ЗАО «Институт телекоммуникаций»,  
научный секретарь.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: теория вычислений – theory of calculations; функционально-логическое программирование – functional-logic programming; потоковые вычисления – stream calculations.

Рассматривается концептуальная основа решения задачи учета и компенсации возмущающих факторов процесса передачи и приема информации при мониторинге технических систем. Представлена математическая постановка задачи. Практическая значимость материала заключается в предложении концептуальных принципов компенсации факторов логической сложности контролируемых систем, доверительной сложности процессов передачи и приема измерительной информации и других факторов. Новизной материала является интерпретация для решения поставленной задачи процедур анализа свойств вычислительных сетей Петри.

The conceptual basis of the decision of the task of the registration and compensating of perturbing factors of process of transmission and information reception at monitoring of technical systems is considered. Mathematical setting of the task is presented. Practical significance of a material consists in a sentence of conceptual principles of compensating of factors of logic complexity of controllable systems, confidential complexity of processes of transmission and reception of the measuring information and other factors. Novelty of a material is interpretation for the decision of a task in view of procedures of the analysis of properties of computer networks the Petri.

### Введение

Современное развитие информационных технологий позволяет реализовать на практике концепцию единого информационного пространства в различных, технически и организационно сложных областях деятельности [1, 2]. Единство информационного пространства является необходимым условием «сквозного», т.е. на протяжении всего жизненного цикла технической системы (ТС), автоматизированного мониторинга процессов проектирования, изготовления, испытаний, применения, а также обработки и анализа информации ТС. Основной проблемой, подлежащей при этом решению, является отсутствие единых принципов моделирования и последующего контроля процессов целевого функционирования ТС. Причиной данной проблемы является сложность учета факторов различной природы, негативно обуславливающих процесс формирования, передачи, приема, обработки и анализа измерительной информации о ТС.

Одним из решений указанной проблемы является информационная технология интеллектуального мониторинга. Под мониторингом понимается автоматизированный синтез, контроль и корректировка моделей процессов формирования, передачи, приема и анализа информации при производстве, испытаниях и применении ТС в различных предметных областях [3]. Об интеллектуальности мониторинга можно говорить, когда при нем начинают учитываться различные факторы, сопровождающие и, особенно, усложняющие названные процессы.

Теоретической основой такой информационной технологии является метод интеллектуального мониторинга ТС на основе функционально-логических программ потоковых вычислений. Данный метод представляется совокупностью следующих элементов:

1. Концептуальная модель интеллектуального мониторинга состояния ТС с компенсацией возмущающих факторов на основе функционально-логических моделей вычислений.

2. Модели интеллектуального мониторинга с использованием вычислительных сетей Петри [4] и G-сетей [5] с предикативно-операторным расширением.

3. Метод синтеза функционально-логических программ потоковых вычислений на основе системы эквивалентных преобразований с верификацией корректности вычислимости.

4. Метод организации потоковых вычислений с использованием модифицированных цветных сетей Петри.

Настоящий материал непосредственно посвящен первой составляющей, являющейся основой или деревом целей и задач компенсации при мониторинге факторов, возмущающих процесс передачи и приема информации.

В статье вводится или доопределяется ряд понятий. Программой называется система вычислений, которая для некоторого набора исходных данных позволяет по однозначно определенной последовательности действий, выполняемых «механически» без участия человека, получить некоторый результат [6, 7]. Функционально-логической программой называется программа, создаваемая в результате применения принципов функционального программирования [8] (в данном случае используется вызов единой функции с различными параметрами) с реализацией логических взаимосвязей между операторами (операциями). Под потоковыми вычислениями понимается обработка информации различного рода (измерительной, технологической), характеризующей ТС. Особенностью процесса обработки такой информации является необходимость обеспечения возможности параллелизма и асинхронности выполнения отдельных операций и их совокупностей, т.е. потоков [9–11].

## Постановка задачи интеллектуального мониторинга

Для математической постановки задачи интеллектуального мониторинга использован теоретико-множественный подход.

Данные для мониторинга:

1. Исходная спецификация программы мониторинга контролируемого процесса  $R$  (кратко программа  $R$ ) – кортеж:

$$R = \langle S, L \rangle,$$

где:  $S = \{S_k | k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$  – множество операций программы  $R$ ,  $I_s$  – множество номеров операций, операция программы может быть проинтерпретиро-

вана как распределенный в некотором пространстве длительности выполнения оператор;

$L = \{l_k | k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$  – множество кортежей, обуславливающих выполнение операции  $S_k$ .

2. Кортеж  $l_k$ :

$$l_k = \langle K_k, t_k, \tau_k \rangle,$$

где:

–  $K_k = \langle B_b^{(k)}(x), B_f^{(k)}(x) \rangle$  – управляющий кортеж операции  $S_k$ , состоящий из предикатов;

–  $B_b^{(k)}(x)$  – предикат начала выполнения операции,  $b$  – «begin»;

–  $B_f^{(k)}(x)$  – предикат окончания выполнения операции,  $f$  – «finite»;

–  $x \in X$  – аргумент  $B_b^{(k)}(x)$  и  $B_f^{(k)}(x)$ ;

–  $X = X_1 \cap X_2 \cap X_3$ ,  $X_1$  – множество первичных результатов измерений параметров ТС,  $X_2$  – множество вторичных (вычисляемых) характеристик ТС,  $X_3 = \{f(B_b^{(k)}), f(B_f^{(k)}) | k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$ ,  $X$  – множество возможных типов аргумента  $x$ ;

–  $t_k$  – момент начала выполнения операции  $S_k$ ;

–  $\tau_k$  – длительность операции  $S_k$ . Величины  $t_k$  и  $\tau_k$  могут быть представлены и с помощью предикатов, соответственно:  $B_b^{(k)}, B_f^{(k)}$ .

3. Система показателей качества мониторинга состояния ТС:

–  $P = \{p_i | i = 1 \dots \text{card}(P)\}$  – частные показатели;

–  $P_{\text{тп}} = \{p_{\text{тп}} | i = 1 \dots \text{card}(P_{\text{тп}})\}$  – требуемые значения частных показателей;

–  $P_{\Sigma} = f(P)$  – единый комплексный интегральный показатель качества.

Требуется найти:

1.  $S$  – структуру формального описания унифицированной модели типовой операции программы потоковых вычислений, такую что:

–  $\exists S(t) \rightarrow y, S\{t'\} \rightarrow y', y \neq y' \rightarrow S(t) \neq S\{t'\}$ , где  $y$  и  $y'$  – текущее и последующие ее выходные параметры,  $S(t)$  и  $S\{t'\}$  – текущее на момент  $t$  и последующее на момент  $t'$  состояния модели;

–  $\exists u(t): S(t) \rightarrow S\{t'\}$ , где  $u \in U$  – вариант управлений моделью, множество вариантов управлений  $U = \{\text{«Старт»}, \text{«Стоп»}, \text{«Приостановка»}, \text{«Возобновление»}, \text{«Изменение состояния операции»}\}$ .

2.  $R^l$  – структуру формального описания функционально-логической программы потоковых вычислений, такую что:

–  $S_k \in R^l, k = 1 \dots \text{card}(I_s)$ ;

– на  $\{S_k | k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$  для отношений следования ( $O_1$ ), независимости ( $O_2$ ), несовместности ( $O_3$ ) и совместности ( $O_4$ ) выполняются аксиомы, определяющие наличие свойства частичного порядка:

$S_k(S_k O_j S_k)$  – свойство рефлексивности;

$S_{k_1, k_2, k_3}(S_{k_1} O_j S_{k_2}) \cap (S_{k_2} O_j S_{k_3}) \rightarrow (S_{k_1} O_j S_{k_3})$  – свойство транзитивности;

$S_{k_1, k_2}(S_{k_1} O_j S_{k_2}) \cap (S_{k_2} O_j S_{k_1}) \rightarrow (S_{k_1} = S_{k_2})$  – свойство антисимметричности,  $\forall k, j = 1..4$ ;

3.  $Q$  – структуру формального описания технических ограничений программы или контролируемого процесса, такую что:

$$Q = \{q_k \mid k = 1 \dots \text{card}(Q)\};$$

$$q_k(t) \rightarrow q_k(t') \Rightarrow Q(t) \rightarrow Q(t') \Rightarrow S(t) \rightarrow S(t') \Rightarrow R^l(t) \rightarrow R^l(t');$$

–  $q_k(t) \mid k = 1 \dots \text{card}(Q)$  – нестационарная конечно-мерная конечная функция с дискретными значениями [7].

4.  $O: R \rightarrow R^l$  – оператор преобразования модели  $R$  в конструкцию  $R^l$  – оператор синтеза функционально-логической программы  $R^l$ , такой что:

–  $\exists \mu: R^l \rightarrow R - \mu$  – оператор ресинтеза  $R$  исходной спецификации по синтезированной программе  $R^l$  для проверки частичной правильности программы по идентичным пред и пост условиям и проверки завершаемости программы;

–  $(\exists \eta = \{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}) \cap (\eta_1 = 1) \cap (\eta_2 = 1) \cap (\eta_3 = 1)$ , где  $\eta_1$  – предикат проверки непротиворечивости программы  $R^l$ ,  $\eta_2$  – корректности и  $\eta_3$  – активности.

5.  $M: R^l \times R^l \times R^l \times u \rightarrow Re$ , оператор интеллектуального мониторинга с принятием решения  $Re$  о состоянии контролируемой системы,  $Re = M(R^l(t_0), R^l(t), R^l(t_{тр}), u(t)), R^l(t_0)$  – начальное состояние,  $R^l(t)$  – текущее состояние,  $R^l(t_0)$  – требуемое состояние,  $u(t)$  – управление процессом, такой что будет выполнено условие пригодности оператора  $M$ :

$$Pr(p_i \mid i = 1 \dots \text{card}(P_{тр})) = \langle \text{«истина»} \rangle,$$

где:

$$Pr(p_i \mid i = 1 \dots \text{card}(P_{тр})): (p_1 \geq p_{1тр} \cap \dots \cap (p_{\text{card}(P)} \geq p_{\text{card}(P)тр})) \cdot$$

Вследствие сложности решаемой задачи искомым оператор  $M$  может не иметь строгого формального выражения в виде функции, содержащей аргументы и значения. Он может быть представлен как совокупность действий или программа (алгоритм) потоковых вычислений по преобразованию исходных данных в искомый вид.

### Концептуальная модель интеллектуального мониторинга технических систем

Концептуальная модель должна включать в соответствии с определением интеллектуальной системы [12] подсистему представления данных и знаний в предметной области и подсистему манипуляции указанными данными и знаниями. На рис. 1 представлена первая подсистема.

На верхнем уровне представлены возмущающие факторы, оказывающие влияние на весь жизненный цикл ТС, искажающие процесс мониторинга. Под искажениями процесса мониторинга понимается при этом



Рис. 1. Подсистема представления данных и знаний об интеллектуальном мониторинге состояния ТС



Рис. 2. Подсистема преобразования моделей

не только фактическое искажение значений измеряемых параметров, а комплексное паразитное изменение всего процесса мониторинга: от непосредственного влияния на измерения до нарушения процесса их обработки и анализа вследствие временных ограничений на получение результата соответствующих процессов. Содержание факторов:

1. Техническая сложность контролируемых процессов выражается в разнообразии типов используемой информации: командно-программная информация, телеметрическая информация, технологическая информация, текстовая информация, неформализованные знания и опыт специалистов.

2. Структурная сложность мониторинга заключается в иерархичности контролируемых процессов: «развертка» на одной временной оси всего процесса функционирования ТС невозможна вследствие его чрезвычайной громоздкости.

3. Вычислительная сложность мониторинга определяется большим объемом информации современных сложных организационно-технических систем.

4. Временная сложность определяется директивно заданными сроками мониторинга контролируемых процессов.

5. Доверительная сложность исходной информации заключается в искажениях информации как преднамеренного, так и естественного характера.

6. Логическая сложность мониторинга определяется разнообразием типов зависимостей операций в контролируемых процессах: на практике используются для построения процессов отношения следования, независимости, несовместности и совместности на множестве операций.

7. Структурная и параметрическая динамика экземпляров контролируемых процессов определяется различием изделий ТС одного типа: «абсолютно» идентичных

изделий по структуре систем нет, вносит динамику в параметры систем вариация условий применения ТС.

Исходными вершинами представлены привлекаемые теории для синтеза полимодельного комплекса. Вытекающими из исходных вершин представлены подразделы соответствующих теорий, обеспечивающие формирование частных свойств искомого комплекса. В блоках белого цвета в сером обрамлении представлены задачи, решения которых в совокупности определяют пригодность комплекса. Целесообразно рассмотреть подсистему представления данных и знаний как результат решения совокупности задач по обеспечению соответствующих свойств подсистемы.

Теория моделирования систем предоставляет способ решения задачи описания структуры полимодельного комплекса. С этой целью привлекается теоретико-множественное описание систем для составления денотационной семантики, а также синтаксического описания структуры унифицированной модели типовой операции.

Задача описания функционирования моделей интеллектуального мониторинга решается с помощью положений теории вычислений. В качестве инструментальной и методической основы функционирования полимодельного комплекса используется способ формального описания алгоритма с помощью автоматной модели. Непосредственно используется инструмент потоковых вычислений: G-сети и цветные сети Петри.

На основе теории множеств решается задача обеспечения пригодности предлагаемого полимодельного комплекса в части выполнения свойства частичного порядка на множестве операций моделируемого процесса функционирования ТС.

Подсистема манипуляции данными и знаниями состоит из двух частей. Первая часть представлена на рис. 2 и заключается в преобразовании информации о процессах функционирования ТС в соответствии с

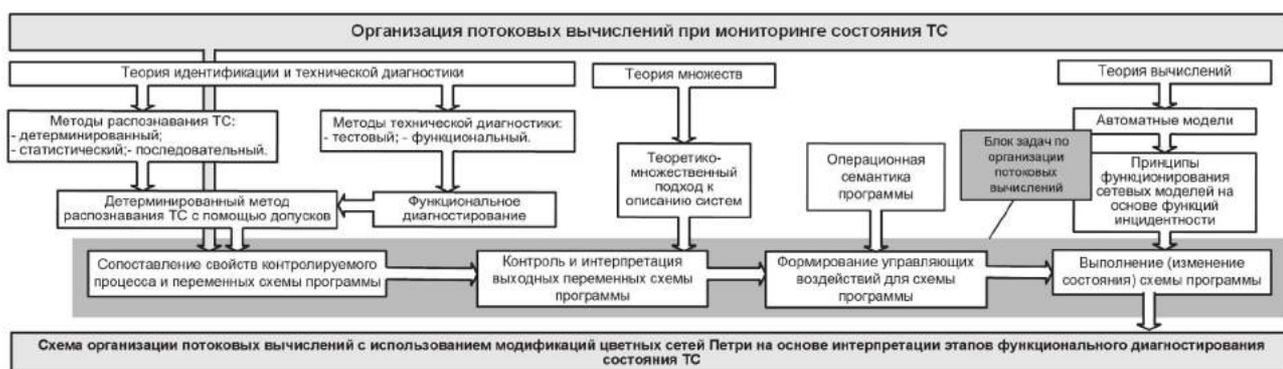


Рис. 3. Подсистема манипуляции моделями

предложенной на рис. 1 структурой описательного полимодельного комплекса.

Представленная на рис. 2 подсистема базируется на положениях теории вычислений и теории моделирования систем. Данные теории предоставляют удовлетворительные средства решения подзадач по компенсации возмущающих факторов. В блоках белого цвета в сером обрамлении представлены преобразования с целью компенсации конкретных факторов.

Привлекается инструмент сетей Петри с модификациями ( $G$ -сети) с целью компенсации факторов структурной и параметрической динамики экземпляров контролируемых процессов, логической и вычислительной сложности мониторинга. Привлечение положений теории вычислений по формальной верификации вычислительных алгоритмов позволяет решить задачу по компенсации факторов технической, структурной и доверительной сложности мониторинга. Снижение вычислительной сложности мониторинга является актуальной задачей во многих предметных областях, где контролируемые технические системы являются большими и сверхбольшими по объему циркулируемой в них информации.

Теория моделирования систем позволяет получить решение подзадачи формирования исходного представления информации о контролируемом процессе [13]. Оно базируется на рекурсивной модели дискретного параллельного процесса [14] и является «первоначальной» спецификацией программы потоковых вычислений, по которой в дальнейшем будет верифицироваться синтезированная программа.

Таким образом, синтезируемая программа является описанием процесса мониторинга на собственном языке программирования, который можно отнести к языкам верхнего уровня.

Вторая часть подсистемы манипуляции данными и знаниями представлена на рис. 3 и заключается в использовании преобразованной информации с целью мониторинга состояния ТС.

Подсистема манипуляции непосредственно организует мониторинг состояния ТС. Мониторинг вслед-

ствие привлекаемых при синтезе программы теорий заключается на внутреннем уровне в функционировании модифицированных цветных сетей Петри. На внешнем уровне мониторинг заключается в интерпретации этапов функционального диагностирования ТС на основе циклической совокупности операций:

1. Сопоставления свойств контролируемого процесса и его модели.
2. Контроля и интерпретации результатов контроля параметров модели.
3. Формирования управляющих воздействий для модели.
4. Выполнения (изменения) состояния модели.

Положения теории вычислений применяются в части принципов функционирования сетевых моделей, а также принципов формирования операционной семантики программы потоковых вычислений, сформулированных в подсистеме описания полимодельного комплекса.

Для практической проверки правильности привлечения подразделов теории вычислений в части сетей Петри и  $G$ -сетей в качестве теоретической базы интеллектуального мониторинга использована среда CPN Tools [15–17]. В данной системе создавались необходимые модели, которые показали удовлетворение предъявленных требований по компенсации рассматриваемых возмущающих факторов.

Таким образом, рассмотрена в полном объеме концептуальная модель интеллектуального мониторинга. Данная модель позволяет определить средства достижения глобальной цели мониторинга, а именно определение состояния контролируемой ТС, причем будут компенсированы возмущающие факторы процесса приема и передачи информации.

## Заключение

В статье была поставлена задача учета и компенсации возмущающих факторов процесса передачи и приема информации при мониторинге ТС на основе функционально-логических программ потоковых вычислений и приводится концептуальная основа ее

решения. Данные программы являются языком верхнего уровня при «программировании» процессов формирования, передачи, приема и анализа технической и технологической информации, характеризующей ТС.

Представленный материал базируется на положениях теории вычислений, моделирования систем, теории множеств. Представленная концептуальная модель языка «программирования» вычислительных процессов отличается:

- разработкой полимодельного комплекса интеллектуального мониторинга, сохраняющего на множестве операций контролируемого процесса свойство частичного порядка и охватывающего класс частично-рекурсивных функций;

- реализацией подхода функционального программирования при синтезе программы потоковых вычислений на основе модифицированных цветных сетей Петри;

- формализацией процедур поиска и устранения ошибок на основе интерпретации и проверки свойств сетей Петри и G-сетей,

- разработкой процедуры верификации синтезированной программы на основе проверки свойства ее полной (тотальной) правильности.

Практическая значимость и актуальность функционально-логических программ потоковых вычислений заключается в учете при их синтезе различных факторов, негативно обуславливающих процесс мониторинга состояния ТС. Предусматриваются процедуры корректировки синтезированной программы, которые компенсируют факторы логической, технологической, технической и т.п. сложности мониторинга.

Направлением применения представленного метода синтеза программ потоковых вычислений является проектирование схем вычислительных процессов, связанных с обработкой больших данных (Big Data) в сложных условиях. Например, предметной областью внедрения информационной технологии интеллектуального мониторинга может стать космическая деятельность, а именно мониторинг в реальном или близком к нему масштабе времени технического состояния ракетно-космической техники при выполнении ею целевых задач.

## Литература

1. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовкой и пуском ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению / Р.Н. Ахметов [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 3–54.

2. Концепция информатизации Роскосмоса (2010–2015 гг.). Федеральное космическое агентство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.federspace.ru/2158>, свободный. – Загл. с экрана.

3. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных инфор-

мационных технологий / О.В. Майданович [и др.] // Информационные технологии. Приложение. – 2011. – № 10. – 32 с.

4. Peterson, James L. Petri Net Theory And The Modeling Of Systems / J.L. Peterson. – Prentice-hall, inc., Englewood Cliffs, N.Y., 1981.

5. Охтилев, М. Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа: монография / М.Ю. Охтилев. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1999. – 162 с.

6. Kalman, R. E. Topics in Mathematical System Theory / R.E. Kalman, P.L. Falb, M.A. Arbib – N. Y.: McGraw-Hill, 1969. – 358 p.

7. Парийская, Е. Ю. Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем [Электронный ресурс] / Е.Ю. Парийская // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 1997. – № 1. – Режим доступа: <http://www.meta.math.spbu.ru/diffjournal/pdf/j004.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.

8. Игошин, В. И. Математическая логика и теория алгоритмов / В.И. Игошин. – 2-е изд. – М.: ИЦ «Академия», 2008. – 448 с.

9. Усталов, Д. А. Коллективные потоковые вычисления: реляционные модели и алгоритмы / Д.А. Усталов // Моделирование и анализ информационных систем. – 2016. – № 23(2). – С. 195–210. DOI:10.18255/1818-1015-2016-2-195-210.

10. Лацис, А. О. Параллельная обработка данных / А.О. Лацис. – М.: Академия. 2010. – 336 с.

11. Левин, В. К. Тенденции развития суперкомпьютеров / В.К. Левин // Computational nanotechnology. – 2014. – № 1. – С. 35–38.

12. Анализ перспективных подходов к решению задач комплексного моделирования технологий самоуправляемых вычислений в критических приложениях / А.И. Лектауэрс [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 6(29). – С. 144–169.

13. Шмелев, В. В. Модели технологических процессов функционирования космических средств / В.В. Шмелев // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 78–93.

14. Лескин, А. А. Сети Петри в моделировании и управлении / А.А. Лескин, П.А. Мальцев, А.М. Спиридов. – Л.: Наука, 1989. – 133 с.

15. Westergaard, M. The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools Simulator / M. Westergaard, L.M. Kristensen // Proc. of 30th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2009). Lecture Notes in Computer Science 5606. – P. 313–322.

16. Jensen, K. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen, L.M. Kristensen, L. Wells // International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)9(3–4). – 2007. – P. 213–254.

17. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets / A.V. Ratzert [et al.] // Proc. of 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2003). Lecture Notes in Computer Science 2679. – P. 450–462.

## Синтез устройств фильтрации помех в тракте навигационного приемника спутниковых радионавигационных систем

### Synthesis of equalizing canal of similar to signals noise within search and detection of navigating signals in apparatus of global navigation satellite systems users

#### Миронов / Mironov V.

Владимир Александрович  
(mirvam@live.ru)

доктор технических наук, профессор.  
ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр  
(ВУНЦ) Военно-воздушных сил (ВВС)  
«Военно-воздушная академия (ВВА) имени  
профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,  
главный научный сотрудник.  
г. Воронеж

#### Неровный / Nerovny V.

Валерий Владимирович  
(val.nerownoyj@yandex.ru)

кандидат технических наук.  
ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н. Е. Жуковского  
и Ю. А. Гагарина, доцент.  
г. Воронеж

#### Коратаев / Korataev P.

Павел Дмитриевич  
(korataev2015@mail.ru)

кандидат технических наук.  
ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н. Е. Жуковского  
и Ю. А. Гагарина, преподаватель.  
г. Воронеж

#### Тимошенко / Timoshenko A.

Александр Васильевич  
(u567ku78@gmail.com)

доктор технических наук, профессор.  
АО «РТИ», руководитель проектов.  
г. Москва

Ключевые слова: помехи – noise; канал компенсации – equalization canal; навигационный сигнал – navigating signal; канал поиска и обнаружения – search and detection canal.

Проведен синтез канала компенсации помех при поиске навигационных сигналов в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем. Разработана математическая модель обнаружителя навигационного сигнала с каналом компенсации сигналоподобных помех, произведена оценка эффективности его функционирования при поиске навигационных сигналов.

Synthesis of equalization canal has been carried out within search of navigating signals in apparatus of Global Navigation Satellite Systems users. The simulator of navigation signal with canal of similar to signals noise detector has been worked out. The efficiency of his operating benefits within search and detection of navigating signals has been assessed.

#### Введение

В последнее время возросла роль аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем (АП ГНСС). Повышаются требования к точности навигационно-временных определений.

Наряду с этим функционирование навигационных приемников спутниковых радионавигационных систем осуществляется в условиях помех. Возникает необходимость снижения влияния помех на АП ГНСС.

С точки зрения функционирования АП ГНСС в условиях воздействия помех различают два режима: поиск навигационного сигнала, слежение за сигналом.

Способы борьбы с помехами в режиме слежения за навигационным сигналом исследованы достаточно полно и представлены в литературе [1, 2]. Способы борьбы с помехами в АП ГНСС, функционирующей в режиме поиска и обнаружения навигационного сигнала, освещены недостаточно и требуют дополнительных исследований.

Одним из возможных способов борьбы с помехами в режиме поиска навигационных сигналов АП ГНСС может, является принцип компенсации.

Принцип компенсации помех наиболее четко был сформулирован в [3] и основывался на двухканальном методе приема, когда в основном канале присутствуют полезный сигнал и помеха, в компенсирующем канале – помеха, а сигнал существенно ослаблен. Сложение в противофазе сигналов основного и компенсирующего каналов приводит к снижению уровня помехи без существенного ослабления сигнала. Такой подход к подавлению помех дал хорошие результаты в радиолокационных системах (РЛС), в системах связи [3].

Однако принцип компенсации помех при повышении помехозащищенности АП ГНСС в режиме

поиска-обнаружения навигационных сигналов до настоящего времени не применялся.

Стоит отметить, что одним из видов помех, воздействующих на навигационные приемники, являются сигналоподобные помехи (СП). Для обоснования структуры навигационного приемника, функционирующего в режиме поиска навигационных сигналов с использованием принципа компенсации помех, необходимо рассмотреть задачи, решаемые компенсационным каналом.

Канал компенсации СП в АП ГНСС должен решать следующие задачи:

- определение факта наличия СП с заданной структурой и грубую оценку параметров помехи;
- точную оценку параметров СП.

Задача обнаружения и грубой оценки параметров помех может решаться с использованием схем известных обнаружителей. Задачу точной оценки параметров помех целесообразно решать с использованием следящих систем.

Возникает необходимость синтеза оптимальной структуры приемника навигационных сигналов в режиме поиска и обнаружения при воздействии СП.

Цель работы: Синтез канала компенсации помех с известной структурой в АП ГНСС при поиске-обнаружении навигационных сигналов.

## Синтез алгоритма поиска-обнаружения помехи

В общем виде навигационный сигнал, действующий на вход канала поиска навигационного сигнала АП ГНСС можно представить как:

$$y_k(t) = S_C(t_{k,j}, \lambda_{c,k}) + \theta S_{\Pi}(t_{k,j}, \lambda_{\Pi,k}) + n(t_{k,j}), k = \overline{1, N} \quad (1)$$

$S_C(t_{j,k}, \lambda_{c,k}) = A_C G_{\text{ДК}}(t_{k,j} - \tau_{c,k}) \cos(\omega_C t_{k,j} + \varphi_{C,k})$  – навигационный сигнал, где  $A_C, \omega_C, \varphi_{C,k}$  – амплитуда, частота и фаза,  $G_{\text{ДК}}(t)$  – дальномерный код навигационного сигнала  $S_{\Pi}(t_{k,j}, \lambda_{c,k}) = A_{\Pi} G_{\Pi}(t_{k,j} - \tau_{c,k}) \cos(\omega_{\Pi} t_{k,j} + \varphi_{\Pi,k})$  – сигналоподобная помеха, где  $A_{\Pi}, \omega_{\Pi}, \varphi_{\Pi,k}$  – амплитуда, частота и фаза СП, подлежащие оценке,  $G_{\Pi}(t)$  – псевдослучайная последовательность СП;  $\theta$  – параметр, характеризующий наличие или отсутствие помехи в наблюдаемой реализации, который будем полагать случайной величиной, принимающей значение 0 или 1 с априорными вероятностями  $P_{\text{ар}}(\theta = 0), P_{\text{ар}}(\theta = 1)$ .

Воспользуемся известным методическим подходом, представленным в [2]. В отличие от известного подхода предполагается, что помеха является полезным сигналом, а навигационный сигнал помехой.

При приеме СП на выходе корреляторов канала поиска помехи (КПП) формируется синфазная и квадратурные компоненты:

$$I_{\Pi}(N) = \sum_{k=1}^N y_k G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\delta} \cos(\omega_0 t_k) \quad (2)$$

$$Q_{\Pi}(N) = \sum_{k=1}^N y_k G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\delta} \sin(\omega_0 t_k) \quad (3)$$

Напряжение на выходе канала компенсации СП:

$$X_{\Pi}^2(N) = I_{\Pi}^2(N) + Q_{\Pi}^2(N) \quad (4)$$

По критерию Неймана-Пирсона уровень порога определяется как

$$h_{\Pi}(N) = X_{\Pi} \sqrt{2 \ln(1/F)} \quad (5)$$

где  $h$  – пороговый уровень;  $X_{\Pi}$  – значение напряжения СП;  $F_{\Pi}$  – вероятность ложной тревоги.

Решение о наличии СП принимается при выполнении условия:

$$X_{\Pi} \geq h_{\Pi} \quad (6)$$

Таким образом, предложенный алгоритм обнаружения СП вычисляет огибающую  $X_{\Pi}$  на выходе компенсатора сигналоподобных помех (КСП) и сравнивает значение этой огибающей с порогом  $h_{\Pi}$ .

## Синтез алгоритма оценки задержки сигналоподобных помех

Для определения точной оценки параметров помех необходимо иметь данные об информативных параметрах помехи, в случае СП такими параметрами являются задержка  $\tau_{\Pi}$ , амплитуда  $A_{\Pi}$ , фаза  $\varphi_{\Pi}$ .

Воспользуемся методикой синтеза, предложенной в [2]. Введем информативные параметры помехи – в объединенный вектор оцениваемых параметров. При этом задача сводится к синтезу алгоритма оценивания параметров помехи. Решением такой задачи, как известно, является расширенный фильтр Калмана [4], алгоритмы работы которого описываются следующими уравнениями:

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + D_{x,k} \left( \frac{\partial F_k(\tilde{x})}{\partial x} \right)^T, \tilde{x}_k = f_{k-1}(\tilde{x}_{k-1}) \quad (7)$$

где  $\hat{x}_k$  – фильтрационная оценка, полученная на  $k$ -ом шаге;  $\tilde{x}_k$  – экстраполированная оценка;  $D_{x,k}$  – матрица дисперсии фильтрационных оценок;  $F_x(x) = \ln \bar{p}_k(\lambda)$  – логарифм функционала правдоподобия  $\bar{p}_k(\lambda)$ , записанного для интервала  $[t_{k-1}, t_k]$  и усредненного по множеству значений неинформативных параметров. Интервал оценивания  $[t_{k-1}, t_k]$  в АП ГНСС составляет 1 мс.

Синтез алгоритма оценивания задержки сводится к синтезу дискриминатора:

$$U_{\partial k} = \left( \frac{\partial F_k(\hat{x}_k)}{\partial x} \right)^T \quad (8)$$

по объединенным информационным параметрам помехи.

Проведем синтез дискриминатора задержки огибающей сигнала. Общее выражение для дискриминатора задержки огибающей имеет вид:

$$U_{\partial\tau,k} = \left. \frac{\partial F_k(\tau_{\Pi,k})}{\partial \tau_{\Pi}} \right|_{\tau_{\Pi,k} = \tilde{\tau}_{\Pi,k}} \quad (9)$$

в котором в качестве  $\partial \tilde{F}_k(\tau_{\Pi,k})$  следует использовать усредненную функцию правдоподобия:

$$\tilde{F}_k(\tau_{\Pi,k}) = \tilde{c}_1 + \ln \left( ch \left( \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \cdot \tilde{s}(t_{k-1,i} \cdot c\tau_{\Pi,k}) \right) \right) \quad (10)$$

Подставив (10) в (9) и выполнив дифференцирование, получаем

$$U_{\partial\tau,k} = th \left( \frac{2A}{N_0} \tilde{I}_k \right) \times \frac{2A}{N_0} \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \cdot \frac{\partial G_{\Pi}(t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k})}{\partial \tau} \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \quad (11)$$

Дифференцирование  $G_{\Pi}(t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k})$  по задержки часто заменяют вычислением конечной разности. Введем расстройку  $\Delta\tau$  и запишем

$$\frac{\partial G_{\Pi}(t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k})}{\partial \tau} \approx \frac{G_{\Pi}(t_{k-1,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi} + \Delta\tau/2)) - G_{\Pi}(t_{k-1,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi} - \Delta\tau/2))}{\Delta\tau} \quad (12)$$

Подставляя данное представление в (11) и опуская несущественные константы, получаем следующее выражение для дискриминатора задержки огибающей

$$U_{\partial\tau,k} = th \left( \frac{2A_{\Pi}}{N_0} \tilde{I}_{\Pi,k} \right) \cdot (\tilde{I}_{\Pi E,k} - \tilde{I}_{\Pi L,k}) \quad (13)$$

При приеме СП на выходе корреляторов формируется следующие компоненты:

$$\tilde{I}_{\Pi,k} = \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \cdot G_{\Pi}(t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k}) \quad (14)$$

$$\tilde{I}_{\Pi E,k} = \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \cdot G_{\Pi}(t_{k-1,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi,k} + \Delta\tau/2)) \quad (15)$$

$$\tilde{I}_{\Pi L,k} = \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \cdot G_{\Pi}(t_{k-1,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi,k} - \Delta\tau/2)) \quad (16)$$

где  $G_{\Pi}(t_{k-1,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi,k} \pm \Delta\tau/2))$  – опаздывание и опережение псевдослучайной последовательности.

### Синтез алгоритма оценки фазы помехи

Вспользуемся методикой синтеза, приведенной в [2]. В соответствии с этой методикой запишем выражение для оптимального дискриминатора фазы сигнала

$$U_{\partial\varphi_{\Pi,k}} = \left. \frac{\partial F_k(\varphi_{\Pi,k})}{\partial \varphi_{\Pi}} \right|_{\varphi_{\Pi,k} = \tilde{\varphi}_{\Pi,k}} \quad (17)$$

В качестве  $\partial \tilde{F}_k(\varphi_{\Pi,k})$  следует использовать выражение аналогичное (10). Подставив (10) в (17) и выполнив дифференцирование получим

$$U_{\partial\varphi_{\Pi,k}} = -th \left( \frac{2A}{N_0} \tilde{I}_k \right) \times \frac{2A}{N_0} \tilde{Q}_{\Pi,k} \quad (18)$$

где

$$\tilde{I}_{\Pi,k} = \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \cdot G_{\Pi}(t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k}) \quad (19)$$

$$\tilde{Q}_{\Pi,k} = \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \sin(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \cdot G_{\Pi}(t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k}) \quad (20)$$

Из (18–20) следует, что фазовый дискриминатор строится на базе синфазного  $\tilde{I}_k$  и квадратурного  $\tilde{Q}_k$  корреляторов. Характеристики фазовых детекторов приведены в [2]. Наиболее просто реализуемыми являются дискриминаторы, обладающие небольшим раскрывом ДХ.

Выражения (19–20), приведенные в [2], наиболее справедливы для сигналов модулированных навигационным сообщением. У этих типов дискриминаторов апертура ДХ  $\pi$ . Для СП, не модулированных навигационным сообщением, выражения (18–20) можно упростить:

$$U_{\partial\varphi_{\Pi,k}} = \frac{2A}{N_0} \tilde{Q}_{\Pi,k} \quad (21)$$

У этого типа дискриминатора апертура ДХ равна  $2\pi$  [5]. В случае воздействия на АП ГНСС СП  $\tilde{Q}_{\Pi,k}$  будет соответствовать выражению (20).

### Синтез алгоритма оценки амплитуды помех

Оценка напряжения на выходе дискриминатора амплитуды проводится по формуле (22)

$$U_{\partial A_{\Pi,k}} = \left. \frac{\partial F_k(A_{\Pi,k})}{\partial A_{\Pi}} \right|_{A_{\Pi,k} = \tilde{A}_{\Pi,k}} \quad (22)$$

Конкретизируем данное выражение[3], по аналогии можно записать:

$$U_{\partial A_{\Pi,k}} = \frac{2\tilde{I}_{\Pi}}{T_{\Pi}} \quad (23)$$

где  $T_{\Pi}$  – длительность помехи.

При приёме СП,  $\tilde{I}_{\Pi,k}$  будет соответствовать выражению

$$\tilde{I}_{\Pi,k} = \sum_{i=1}^N y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \varphi_k) T_{\partial} \quad (24)$$

## Синтез алгоритма поиска-обнаружения с учетом компенсации помехи

После получения точной оценки параметров помех возникает возможность формирования копии принимаемой помехи  $\tilde{S}_{\Pi,k}$  и необходимость ее вычитания из смеси сигнал+шум  $y_k$ .

При формировании копии помехи в вычитающем устройстве компенсационного канала происходит вычитание сформированной копии помехи из поступающей смеси сигнала и шума, действующих на вход канала поиска навигационного сигнала АП ГНСС, тогда синфазные и квадратурные составляющие определяются в соответствии с выражениями:

$$I(N) = \sum_{i=1}^N (y_k - \tilde{S}_{\Pi,k}) \cdot G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\partial} \cos(\omega_0 t_k) \quad (25)$$

$$Q(N) = \sum_{i=1}^N (y_k - \tilde{S}_{\Pi,k}) \cdot G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\partial} \sin(\omega_0 t_k) \quad (26)$$

где  $\tilde{S}_{\Pi,k}$  – копия помехи:

$$\tilde{S}_{\Pi,k} = \tilde{A}_{\Pi} G_{\Pi}(t_k + \tilde{\tau}_3) \cos(\omega_0 t_k + \tilde{\varphi}_{\Pi}) \quad (27)$$

где  $\tilde{\tau}_3$  – оценка задержки копии помехи,  $\tilde{A}_{\Pi}$  – оценка амплитуды копии помехи,  $\tilde{\varphi}_{\Pi}$  – оценка фазы копии помехи.

## Заключение

Разработанные математические модели представляют собой научно-методический и практический аппарат, в своей совокупности позволяющий разрабатывать перспективные образцы аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, фильтрация помех в которых будет осуществляться на этапе поиска навигационных сигналов, что существенно повысит помехоустойчивость аппаратуры потребителей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-6831.2016.8.

## Литература

1. Шувалов, А. В. Синтез и анализ компенсационного алгоритма подавления структурно детерминированных помех / А.В. Шувалов // Радиотехника. – 2005. – № 7. – С. 43–49.
2. Методы компенсации помех в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем / В.В. Неровный [и др.]. – М.: Научная книга, 2017. – 226 с.
3. Защита от радиопомех / под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. Радио, 1976. – 496 с.
4. Перов, А. И. Статистическая теория радиотехнических систем / А.И. Перов. – М.: Радиотехника, 2003. – 320 с.
5. Неровный, В. В. Эффективность поиска и обнаружения BPSK сигналов в аппаратуре потребителя ГНСС в условиях сигналоподобных помех / В.В. Неровный, П.Д. Коратаев, А.А. Литинский // Теория и техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 27–31.

## Организация и проведение авиаучета охотничьих животных с использованием беспилотных авиационных систем самолетного и вертолетного типов

### The organization and carrying out aerial survey of game animals with the use of unmanned aerial vehicles of plane and helicopter types

**Греков / Grekov O.**

Олег Альбертович

(airops@yandex.ru)

кандидат военных наук, доцент.

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный университет», доцент кафедры биоэкологии.

г. Балашиха Московской обл.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты – unmanned aerial vehicles, авиаучет – aerial survey, охотничьи животные – game animals.

Для получения данных о видовом и численном составе охотничьих животных широко применяются беспилотные летательные аппараты (БЛА). В статье рассматриваются вопросы, связанные с организацией и проведением авиаучета охотничьих животных с использованием БЛА. Описываются характеристики БЛА и оборудования для аэросъемки. Раскрывается порядок работы по этапам проведения авиаучета и проблемы, возникающие при дешифрировании снимков. Приведен математический аппарат для получения итоговых данных.

To obtain data on the species and numerical composition of game animals are widely used unmanned aerial vehicles (UAV). The article discusses issues related to the organization and conduct of aircraft survey of animals. Describes the characteristics of UAV and equipment for aerial photography. Reveals the order of work on the stages of the aerial survey and problems encountered in the interpretation of images. There is mathematical apparatus to produce aggregate data.

В последнее десятилетие для самых разных целей мониторинга наземных объектов применяются беспилотные летательные аппараты (БЛА).

При этом, исходя из решаемых задач, БЛА могут быть самолетного или вертолетного типов (Рис.1).

Для мониторинга достаточно значительных территорий (до 100 тыс. га) применяются БЛА самолетного типа, которые обладают возможностью выполнять полет в автоматическом режиме по программе, хорошей дальностью полета – до 250 км и временем полета до 3,5 час. Полезная нагрузка составляет до 3 кг, что позволяет устанавливать на борт цифровое оборудование для аэросъемки.

Для детального исследования небольших площадей (до 1 тыс. га) применяются БЛА вертолетного типа. Технические характеристики БЛА вертолетного типа скромнее, чем у БЛА самолетного типа. В воздухе они держатся 25–50 мин, скорость и грузоподъемность ниже. Преимуществом БЛА вертолетного типа является высокая маневренность, способность зависать над объектом исследования и рассматривать его с разных сторон с очень близкого расстояния.

В последнее десятилетие особое распространение получили мультикоптеры, построенные по вертолётной схеме с тремя и более несущими винтами. Наиболее распространенной схемой мультикоптера для решения мониторинга охотничьих животных является квадрокоптер с четырьмя несущими винтами.

В комплект наземного оборудования для управления БЛА входит пульт управления с радиостанцией для передачи команд на борт и приема информации о состоянии оборудования, параметров полета и видеоизображение подстилающей поверхности.

Поступающая информация отображается на штатном мониторе. Кроме этого, в качестве устройств отображения могут быть использованы ноутбуки, планшеты или смартфоны, поддерживающие соответствующие программные приложения (Android, IOS).

В качестве навесного оборудования на БЛА самолетного и вертолетного типов для получения информации о диких животных и среды их обитания применяются цифровые видеокамеры, фотоаппараты и ИК-камеры, которые устанавливаются внутри корпуса. Видеоизображение с борта БЛА передается на наземное устройство отображения в реальном масштабе времени, а фото и ИК-снимки дешифрируются после полета.

Анализ характеристик современных БЛА [1, 2] показывает, что перед другими средствами авиаучета они обладают рядом преимуществ:



Рис. 1. БЛА «Supercam» самолетного типа (слева) и БЛА вертолетного типа (справа – квадрокоптер DJI Phantom)



Рис. 2. Порядок работы рабочей группы на первом этапе работы

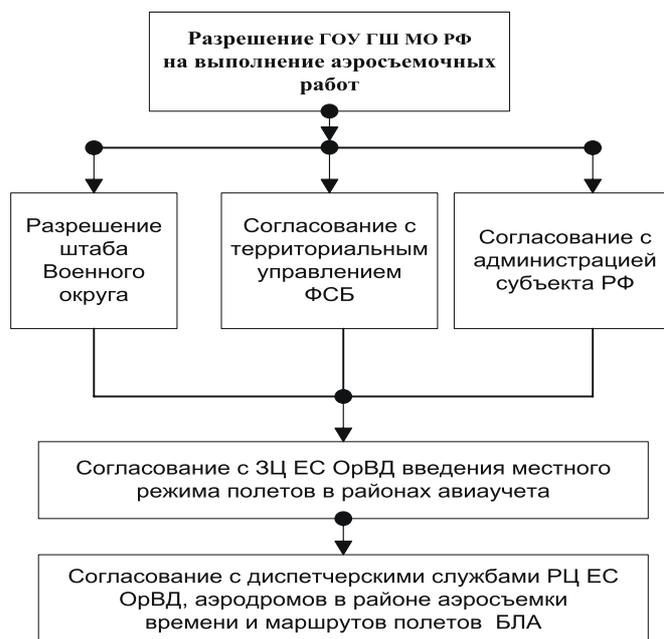


Рис. 3. Порядок работы рабочей группы при получении разрешений

- стоимость БЛА и его эксплуатации ниже, чем других средств;
- грузоподъемность БЛА позволяет размещать специальное оборудование (фото, видео, ИК-систему) для учета охотничьих животных;
- дальность полета позволяет планировать и осуществлять мониторинг на значительном удалении БЛА от точки старта,
- БЛА характеризуются минимальными показателями вибрации и шумности, что практически не беспокоит животных при мониторинге,
- возможность эксплуатации БЛА с неподготовленных площадок или со специальных автомобильных пусковых установок и высокая автономность такой системы обеспечивает его применение в труднодоступных районах.

Опыт организации авиаучетов охотничьих животных с помощью БЛА [3] говорит, что процесс подготовки и выполнения полетов должен включать следующие этапы работы:

- 1 этап – заблаговременная подготовка к выполнению аэросъемки;
- 2 этап – проведение аэросъемки;
- 3 этап – обработка и дешифрирование результатов аэросъемки.

Первый этап начинается с уяснения задачи организационным ядром (руководителями выполнения авиаучета), планированием работы и определением рабочей группы, в состав которой включаются руководитель полетов, оператор наземного комплекса управления, диспетчер и специалисты по дешифрированию результатов съемки.

После постановки задачи рабочая группа изучает район выполнения задачи, способы, сроки и время

проведения авиаучета, детализирует условия безопасного выполнения полетов (рис. 2).

Одновременно направляются запросы в разные инстанции для получения соответствующих разрешений (рис. 3).

После этого рабочая группа выполняет расчеты режимов полета БЛА и рациональных параметров съемки на электронной карте заданного района учета, что позволяет осуществить детальное планирование хода выполнения аэросъемочных работ.

Далее рабочая группа приступает к проведению аэросъемки (2 этап) и выезжает в район проведения авиаучета (рис. 4).

Перед началом полетов рабочая группа решает вопросы обеспечения, связанные с размещением, подготовкой наземной техники и оборудования к полетам, наземной рекогносцировкой и уточнением точек старта.

Непосредственно перед полетами оцениваются метеоусловия и принимается решение на выполнение полетов. После этого БЛА переводится из походного положения в рабочее, разворачивается приемно-передающее оборудование, как правило на крыше автомобиля повышенной проходимости, и проверяется канал связи.

Информация отражается на мониторе (рис. 5). При этом в правой части монитора на фоне электронной карты местности обозначаются поворотные точки маршрута, а в правой части сверху отображается информация от видеокamеры, а под ней – полетная информация (курс, скорость, высота, обороты двигателя и др.)

После завершения всех подготовительных мероприятий БЛА выполняет старт БЛА и выполняет полет на аэросъемку.

Видеоинформация поступает с борта БЛА в реальном масштабе времени, а данные фото- и ИК-съемки посту-

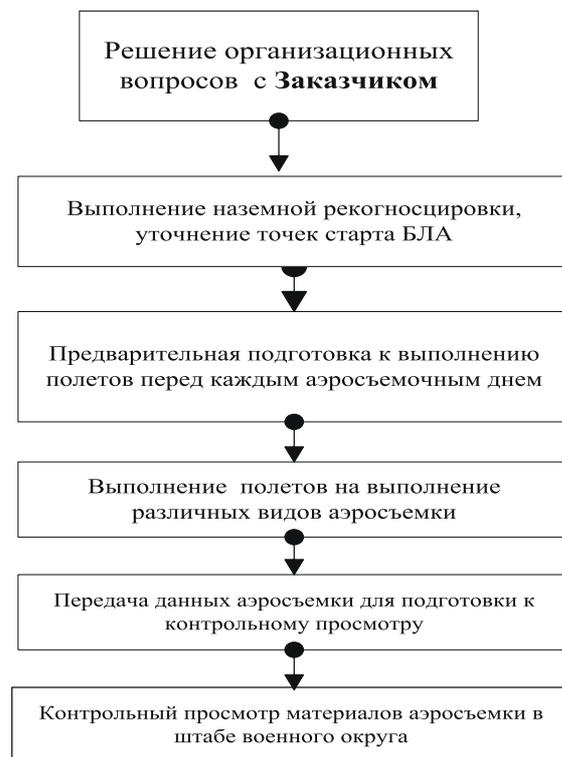


Рис. 4. Порядок работы рабочей группы на втором этапе



Рис. 5. Информация, отображаемая на мониторе при подготовке к полету

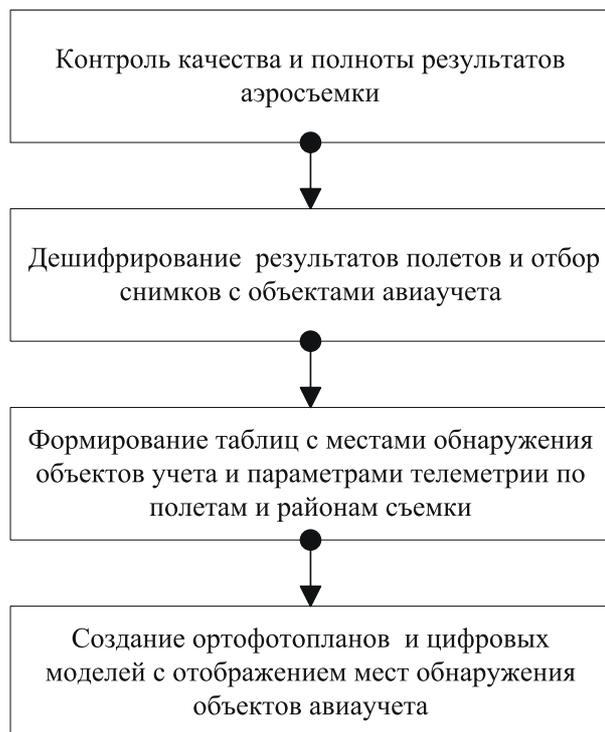


Рис. 6. Порядок работы рабочей группы на третьем этапе

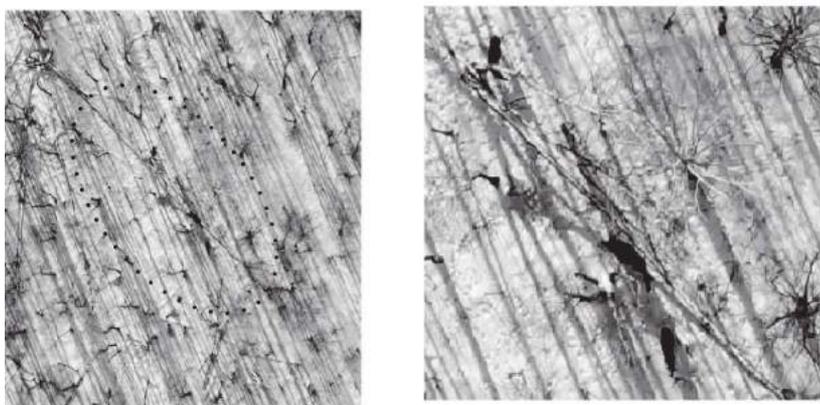
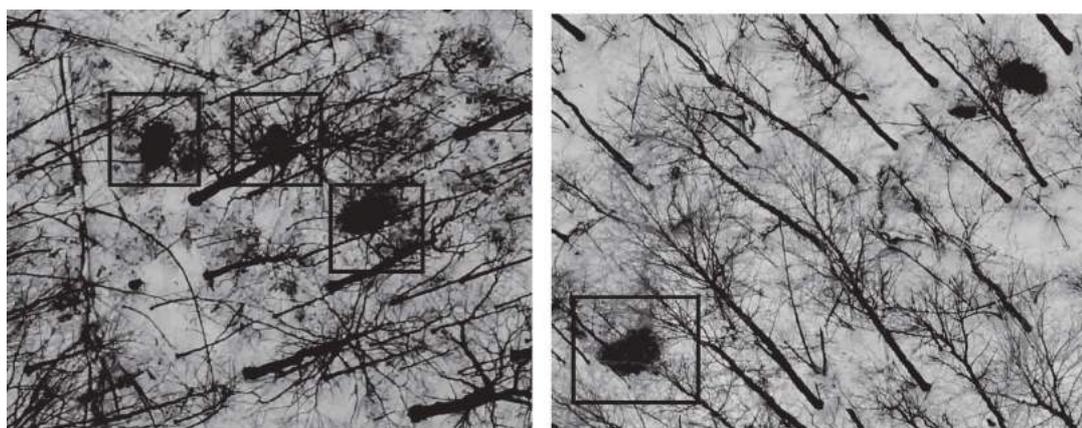


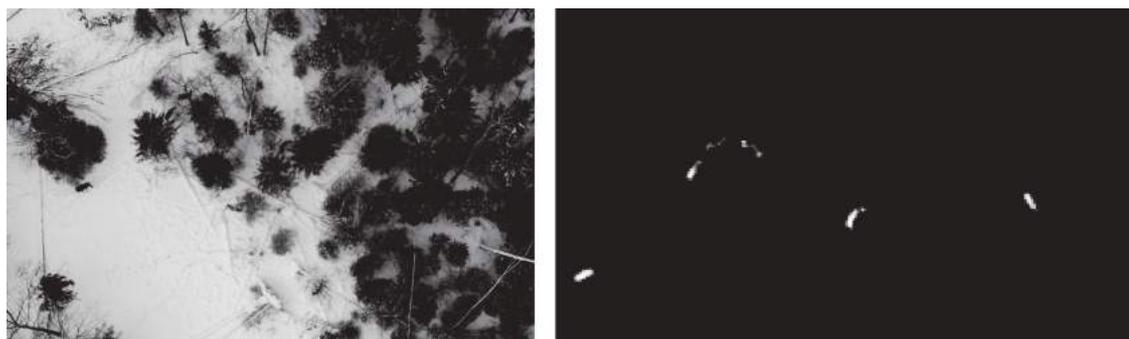
Рис. 7. Фотографии обнаруженных с воздуха лосей (слева) и при увеличении с последующей идентификацией (справа)



*Рис. 8. Трудно распознаваемые объекты аэрофотосъемки*



*Рис. 9. Стволы и кроны деревьев, мешающие распознаванию животных*



*Рис. 10. Фото и ИК снимки шести лосей в лесном массиве, сделанные одновременно*

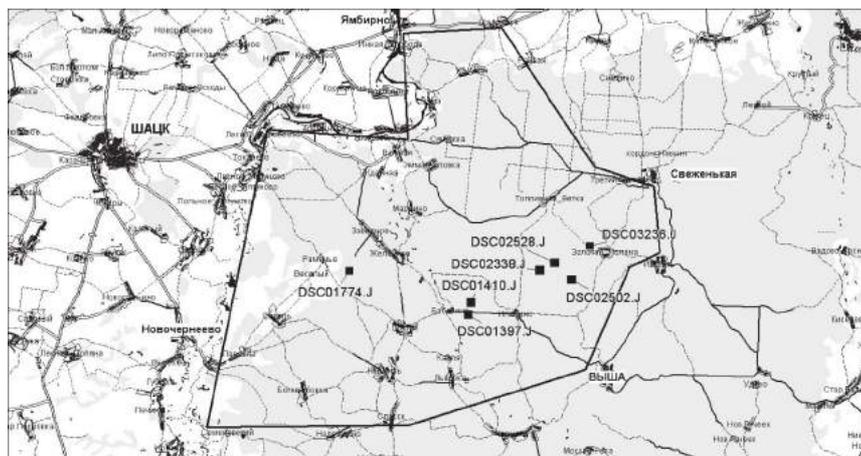


Рис. 11. Места обнаружения охотничьих животных на цифровой карте

пают для контрольного просмотра после выполнения полетов. Полетная информация позволяет отображать реальную траекторию полета БЛА на электронной карте.

После получения результатов аэросъемки рабочая группа приступает к дешифрированию снимков и оформлению результатов авиаучета (рис. 6).

При изучении результатов аэрофотосъемки рабочая группа определяет на снимках наличие объектов учета, а потом, за счет увеличения изображения, идентифицирует их вид (рис. 7).

Степень надежности идентификации объектов учета очень важна, поскольку допущенные ошибки могут накапливаться и искажать итоговые результаты.

Опыт проведения авиаучетов с использованием БЛА показал [4], что в процессе дешифрирования фотоснимков возникает ряд проблем, связанных с надежностью идентификации объектов учета.

Во многом это зависит от профессиональной подготовки специалистов, участвующих в дешифрировании снимков и их физического состояния (усталость, потеря внимания и т.п.). К тому же на некоторых снимках возникают сложности при определении вида животного. Не всегда можно с уверенностью отличить неодушевленный объект от животного (рис. 8).

На снижение надежности распознавания фотоснимков существенное влияние оказывает растительность. Стволы и кроны деревьев даже без листьев размывают контуры животного, а хвоя может затенять весь корпус животного или его часть (рис. 9).

На качество снимков влияет и освещенность. Тени, отбрасываемые животными, в одних случаях способствуют их распознаванию, а в других – затрудняют определение их вида. Поэтому съемку желательно осуществлять при легкой дымке или неплотной средней облачности.

Для оценки вероятности распознавания специалистами изображений на снимках может быть применима методика, основанная на многоканальной модели зрительной системы человека-оператора [5]. Согласно этой методике в зрительной системе оператора происходит опти-

мальный прием и последующий анализ характерных черт (финитных пространственно-частотных гармонических составляющих) образа объекта, на основе которого в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности (критерием идеального наблюдателя) принимается решение об обнаружении и распознавании образов искомым объектов. Вероятность правильного обнаружения объекта описывается выражением [1]

$$P_{\text{обн}} = 1 - \prod_{mn} (1 - P_{\text{обн}_{mn}}), \quad (1)$$

где  $P_{\text{обн}_{mn}}$  – вероятность правильного обнаружения  $mn$ -й гармоники, которая в свою очередь определяется формулой

$$P_{\text{обн}_{mn}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\zeta_{mn}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\zeta_{mn} - \mu_{mn})^2}{2}\right) d\zeta, \quad (2)$$

где  $\zeta_{mn}$  – порог принятия решения об обнаружении  $mn$ -й гармоники, выраженный в нормированных на среднеквадратическое отклонение (СКО) шума значениях реализаций сигнала на выходе  $mn$ -го фильтра и равный

$$\zeta_{mn} = \frac{\ln \Lambda_n + \mu_{mn}}{\mu_{mn}}, \quad (3)$$

где  $\mu_{mn}$  – воспринимаемое отношение сигнала к шуму (ОСШ) на  $mn$ -й гармонике;  $\Lambda_n$  – пороговое отношение правдоподобия.

Автоматизированное распознавание объектов может быть реализовано на основе математического аппарата методики распознавания образов.

Исследования [2, 4, 8] показывают, что существенному повышению надежности аэрофотосъемки способствует одновременное применение оптических и тепловизионных систем (ИК-съемка) и организация синхронной съемки.

Этот способ позволяет с высокой надежностью распознавать объекты ландшафта (лесные массивы, водные объекты, открытые участки) и выделять на их фоне животных или их следы (для зимнего периода времени) (рис. 10).

На основе анализа полученных результатов строятся цифровые модели местности с местами обнаружения охотничьих животных (рис.11).

При наличии соответствующего программного обеспечения (ПО) возможно построение геопространственных 3D-моделей, позволяющих изучать биолого-экологические особенности диких животных на фоне среды их обитания (станции, пути миграции и т.п.).

Для расчета численности охотничьих животных по результатам авиаучета можно использовать «Математические основы учета животных» [7]. В последнее время все больше используются «Методические рекомендации по авиаучету лося и других лесных копытных животных на больших территориях» [6].

В соответствии с этими рекомендациями экстраполированная численность животных учитываемого вида на всей учетной территории рассчитывается как сумма оценок численности животных в отдельных районах авиаучета по формуле:

$$N_0 = \sum_{r=1}^t N_r, \quad (4)$$

где  $N_r$  – оценка численности животных в  $r$ -м районе,  $t$  – общее число районов на всей территории учета.

Средняя плотность охотничьих животных на всей учетной территории рассчитывается по формуле

$$D_o = N_o / S_o, \quad (5)$$

где  $S_o$  – площадь всей учетной территории.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы.

Использование для авиаучета БЛА, скорость полета которых составляет 50–80 км/ч, позволяет более детально и качественно исследовать района учета, чем при использовании других летательных аппаратов. При этом уровень шума от работы двигателя БЛА несоизмерим по своей величине с уровнем шума вертолета или самолета и не пугает животных.

Полеты БЛА выполняются с площадок, расположенных в непосредственной близости от обследуемого района, что значительно экономит ресурсы по сравнению с другими авиационными платформами и не требует сложных видов обеспечения (заправка ГСМ, авионавигационное обеспечение, подготовка взлетно-посадочных площадок и др.).

Технические характеристики аэросъемочного оборудования БЛА, объединенного в бортовой комплекс мониторинга, обеспечивают точное определение мест обнаружения объектов учета, объективность и достоверность численности животных в районах полетов, а передача телевизионной (тепловизионной) информации с БЛА может быть обеспечена в реальном масштабе времени.

Одновременное использование технических средств обнаружения в видимом и ИК-диапазонах позволяет

повысить достоверность данных учета и получать объективные данные о видовом, численном, возрастном и половом составе популяций.

Получение информации от разных источников в цифровом виде обеспечивает ее своевременную обработку и отображение на электронных картах результатов аэросъемки с точной привязкой по месту и времени.

При разработке соответствующего ПО возможно построение геопространственных 3D-моделей района учета, что позволяет осуществлять детальное изучение поведения охотничьих животных в течение определенного времени.

Следующим направлением получения оперативных данных авиаучета охотничьих животных выступает реализация алгоритмов методики распознавания их образов.

Общие затраты на проведение авиаучета с использованием БЛА в настоящее время являются самыми низкими по сравнению с использованием других летательных аппаратов.

### Литература

1. Бенуни, А. А. Модель зрительной системы человека-оператора / А.А. Бенуни, В.Я. Колочкин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2002. – № 4. – С. 43–52.
2. Греков, О. А. Применение современных технических средств и новых информационных технологий в системе авиационного учета численности охотничьих животных / О.А. Греков // XXIX Международный конгресс биологов-охотоведов. Сборник материалов, часть 1. Москва, 17–19 августа 2009 г. – С. 313–315.
3. Греков, О. А. Порядок организации авиаучета охотничьих животных с использованием беспилотных летательных аппаратов / О.А. Греков // Материалы II Международной научно-практической конференции. «Состояние среды обитания и фауна охотничьих животных России и сопредельных территорий». Балашиха, 10–11 марта 2016 г. – С. 106–112.
4. Обнаружение диких животных фото- и тепловизионными средствами на беспилотных летательных аппаратах. Биологические ресурсы: состояние, использование и охрана / Е.К. Еськов [и др.] // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию подготовки охотоведов в Вятской ГСХА. Сборник научных трудов. – Киров, 2015. – С. 64–66.
5. Гулина, Ю. С. Методика расчета вероятности распознавания изображений человеком-оператором / Ю.С. Гулина, В.Я. Колочкин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – № 1. – С. 100–107.
6. Методические рекомендации по авиаучету лося и других лесных копытных животных на больших территориях / ФГУ «Центрохотконтроль». – М., 2009. – 26 с.
7. Челинцев, Н. Г. Математические основы учета животных / Н.Г. Челинцев. – М.: Центрохотконтроль, 2000. – 431 с.
8. Черенков, А. Ю. Отчет о научно-исследовательской работе «Авиаучёт численности лося на территории Рязанской области» / А.Ю. Черенков. – Балашиха: РГАЗУ, 2014. – 48 с.

## Управление доступом к ресурсам ведомственных информационных систем на основе информационных профилей пользователей

### Access control of information resources for departmental information systems based on information user profiles

#### Саенко / Saenko I.

Игорь Борисович  
(ibsaen@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.  
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи  
имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»  
МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),  
профессор.  
г. Санкт-Петербург

#### Кий / Kiy A.

Андрей Вячеславович  
(kiyarmy@yandex.ru)

кандидат технических наук.  
ВАС им. С. М. Буденного,  
доцент кафедры автоматизированных систем  
специального назначения.  
г. Санкт-Петербург

#### Ясинский / Yasinsky S.

Сергей Александрович  
(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.  
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение  
центрального научно-исследовательского института  
связи» (ЛО ЦНИИС),  
научный консультант.  
г. Санкт-Петербург

#### Лыжинкин / Lyzhinkin K.

Константин Владимирович  
(lkv@loniis.ru)

Филиал ФГУП ЛО ЦНИИС,  
заместитель директора.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: защита информации – information security, политика безопасности – security policy, контроль доступа – access control, информационный профиль – information profile.

В статье рассматривается проблема обеспечения безопасности информации в ведомственных информационных системах. Обосновывается необходимость применения в составе системы защиты информации механизмов, обеспечивающих контроль выполнения пользователями процедур обработки информации, определенных требованиями политики безопасности и основанных на применении профилей пользователей. Предложена методика построения профилей пользователей на основе цепей Маркова и методов кластерного анализа.

The paper considers a problem of information security in the departmental information systems. Need of an application as a part of the system of information security the mechanisms providing control of execution by users the procedures processing information determined by requirements of a trust relationships policy and based on application of user profiles is justified. The technique of creation of user profiles on the basis of the Markov chains and methods of cluster analysis is offered.

#### Введение

Обеспечение устойчивого и бесперебойного функционирования информационной, и в первую очередь критической, инфраструктуры Российской Федерации является одним из ключевых национальных интересов в информационной сфере [1]. В связи с этим в ведомственных информационных системах (ВИС) к обеспечению безопасности информационного процесса предъявляются особые требования, которые определяются уровнем конфиденциальности обрабатываемой информации и особенностями условий функционирования данных систем. По этой причине большое значение уделяется развитию, разработке и внедрению систем управления информацией и событиями безопасности [2], которые обеспечивают поддержание требуемого уровня базовой безопасности, установленного руководящими документами для каждого типа таких систем.

Уровень базовой безопасности достигается путем реализации минимального пакета защитных мер, известных как базовые защитные меры. Вследствие различий в процессах выбора защитных мер могут

рассматриваются следующие два пути обеспечения уровня базовой безопасности [3]:

реализация защитных мер в соответствии с типом и характеристиками рассматриваемой системы;

реализация защитных мер в соответствии с базовой типовой моделью угроз безопасности информации, а также в зависимости от характеристик рассматриваемой системы.

В большинстве случаев для обеспечения требуемого уровня безопасности в ВИС применяется первый подход, основанный на классификации информационных систем по уровню защищенности. Однако статистика нарушений безопасности в таких системах показывает, что на практике для обеспечения безопасности информации требуются дополнительные защитные меры. Это связано с тем, что любая политика безопасности и реализующая ее система защиты работают только в случае, если их соблюдают пользователи системы.

В связи с этим возникает необходимость в проверке (контроле) выполнения процедур обеспечения безопасности в действиях пользователей, а также корректности (полномочности) использования предоставленных в доступ информационных ресурсов ВИС. Данная задача может быть решена применением интеллектуальных средств защиты информации, реализующих постоянный, осуществляемый в онлайн-режиме, контроль состояний системы на предмет соответствия некоторому набору эталонов, включающих множество допустимых значений наиболее существенных характеристик информационного процесса, образующих информационный профиль пользователя.

## Механизм управления доступом к данным на основе информационных профилей пользователей

Анализ и использование информационных профилей пользователей представляется достаточно эффективным решением в области защиты от несанкционированного доступа к информации в ВИС. Под информаци-

онным профилем элемента ВИС при этом будем понимать структурированное формализованное описание существенной для защиты информации области в пространстве признаков состояний элемента либо информационных отношений между элементами ВИС, в которой отображается множество эквивалентных с точки зрения управления состояний или траекторий поведения элемента [4].

Анализ нарушений безопасности информации в ВИС показывает, что в большинстве случаев источником угроз безопасности информации является авторизованный пользователь системы. Это обуславливает актуальность подходов к защите информации в ВИС с использованием информационных профилей пользователей. В ВИС основными типами профилей субъектов являются образы процесса реализации пользователями нарушений безопасности информации, т.е. образы состояния создания и реализации угроз безопасности, а также образы безопасного функционирования ВИС.

Применение профилей (образов) безопасного функционирования ВИС в целях защиты от внутренних угроз безопасности является более предпочтительным, так как позволяет выявлять ранее неизвестные типы и сценарии реализации угроз несанкционированного доступа. В целях управления доступом к информационным ресурсам ВИС указанные профили должны отражать схемы использования информационных ресурсов пользователями в процессе выполнения множества функциональных задач, что позволит применять их в качестве дополнительного критерия при принятии решения о предоставлении того или иного вида доступа к информационным ресурсам.

Структура механизма управления доступом к данным на основе информационных профилей пользователей представлена на рис. 1.

Представленный механизм управления доступом состоит из следующих основных компонентов:

- компонент контроля соответствия таблице разграничения доступа на основе дискреционной и мандатной моделей управления доступом;

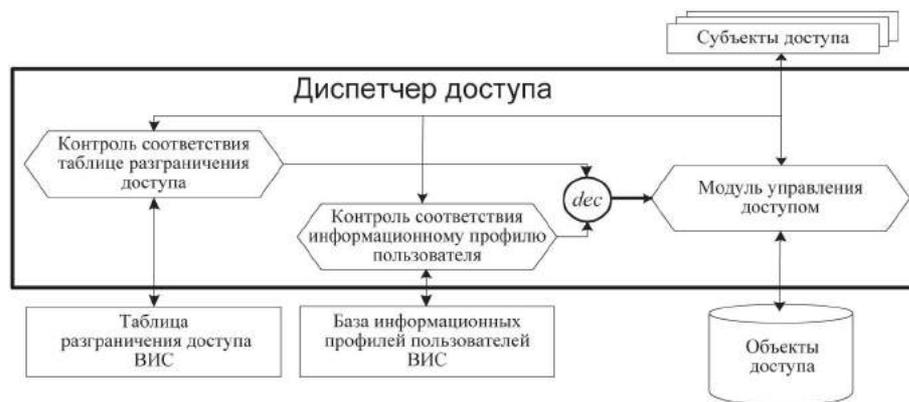


Рис. 1. Механизм управления доступом на основе информационных профилей пользователей

– компонент контроля соответствия информационному профилю на основе сравнения данных о текущих событиях безопасности и характеристик элементов информационного профиля пользователя;

– компонент принятия решения о доступе (*dec*);

– модуль управления доступом.

Особенностью предложенного механизма является принятие решения о доступе не только на основе матрицы разграничения доступа, введенной администратором безопасности ВИС, но и на основе контроля событий безопасности, поступающих с уровня сбора и обработки данных. Контролируется соответствие событий безопасности эталонным значениям информационного профиля, определяемым на основе списка активных процессов пользователя. Тем самым обеспечивается динамика изменения прав доступа в процессе работы пользователя.

### Описание и формирование профилей пользователей

Основу любой системы защиты информации от несанкционированного доступа в ВИС составляет подсистема управления доступом, ключевыми задачами которой являются предотвращение несанкционированного использования защищаемых ресурсов ВИС и предотвращение использования ресурсов неполномочным способом. Первая задача решается с помощью разграничения доступа в соответствии с принятой политикой безопасности и последующего контроля запрашиваемых видов доступа на предмет соответствия предоставленным полномочиям [5].

Задача контроля процедур безопасности использования информационных ресурсов в основном решается организационными мерами, которые предполагают описание правил использования информационных ресурсов и обеспечение их соблюдения. При этом важную роль играют дисциплина и уровень подготовки пользователей. Однако независимо от принятых организационных мер и полноты настроек системы разграничения доступа (СРД) невозможно избежать нарушений политики безопасности. Причинами этого могут быть ошибки при составлении частной модели угроз безопасности для конкретной ВИС, влияющие на выбор используемых методов и средств защиты, противоречивые правила доступа, ошибки администрирования, упрощение политики в процессе настройки СРД, ошибки пользователей, незнание или непонимание политики безопасности пользователями ВИС.

Примерами нарушения процедур безопасного использования предоставленных в доступ информационных ресурсов могут быть копирование информации из файлов, доступных для чтения, разделение файлов, модификация файлов при наличии прав доступа, попытки пользователей получить доступ к информационным ресурсам путем «изучения» ВИС, ознакомление с конфиденциальной информацией, не

предназначенной пользователю, и др. В случае таких нарушений, как правило, отсутствует реакция средств защиты, так как перечисленные действия не нарушают в явном виде политику безопасности. В связи с этим возникает необходимость развития средств управления доступом, способных классифицировать в режиме реального времени легальные действия пользователей по степени опасности для ВИС и принимать на основании заранее определенного набора правил решение о доступе или ограничении полномочий пользователя.

В основе реализации таких механизмов могут быть использованы информационные профили пользователей, описывающие легитимный порядок использования информационных ресурсов ВИС в процессе их деятельности и обеспечивающие принятие решения о правомочности доступа к ресурсу на основе текущей активности пользователей. В связи с этим одним из направлений совершенствования системы защиты информации ВИС является разработка математического и методического аппарата описания и формирования указанных профилей.

С целью определения структуры информационного профиля пользователя и информативных признаков для его построения проведен анализ факторов, влияющих на особенности организации работы пользователей ВИС. К ним относятся: наличие конечного, четко обозначенного в обязанностях перечня функций, выполняемых пользователем; регламентация порядка выполнения указанных функций; цикличность процессов, реализуемых пользователем.

Кроме того, выполнение пользователем каждой функции и реализация соответствующих ей процессов предопределяет набор программ и порядок их использования. Каждая программа имеет функциональное назначение, в рамках которого обладает возможностями по доступу к информационным ресурсам ВИС. Следовательно, выполнение пользователем функциональной задачи можно представить в виде последовательности операций доступа к ресурсам с использованием необходимых программных средств:

$$ts_e = \langle (q_1, q_2, \dots, q_a)_{ts_e}, PR_{ts_e} \rangle, \quad (1)$$

где  $q_a$  – элемент последовательности операций доступа в процессе выполнения функциональной задачи  $ts_e$ ;  $PR_{ts_e} = \{pr_i\}$  – множество программных средств (программ), необходимых для выполнения функциональной задачи  $ts_e$ .

Таким образом, наиболее информативным признаком, отражающим действия пользователя при выполнении функциональной задачи, является событие доступа, представляющее собой комбинацию операции (типа) доступа и идентификатора информационного ресурса. Так как время в вычислительной среде дискретно, а действия пользователя имеют целенаправленный

характер, то наблюдаемая последовательность событий доступа представляет собой случайный процесс с дискретными состояниями и дискретным временем, что позволяет использовать для описания деятельности пользователя аппарат Марковских цепей [6]. В связи с этим, учитывая (1), информационный профиль пользователя  $ip$  при выполнении функциональной задачи  $ts_e$  должен содержать элементы  $ip^{ts_e} = \langle \Lambda^{ts_e}, PR^{ts_e} \rangle$ , где:  $\Lambda^{ts_e} = [N^{ts_e}, K^{ts_e}]$  – Марковская модель наблюдения событий доступа в процессе выполнения пользователем функциональной задачи  $ts_e$ ;  $N^{ts_e}$  и  $K^{ts_e}$  – соответственно вектор начального распределения вероятностей событий доступа и матрица переходных вероятностей событий доступа в процессе выполнения функциональной задачи  $ts_e$ ;  $PR^{ts_e} = \{pr_r\}$  – множество программных средств, необходимых для выполнения задачи  $ts_e$ .

Выбор пользователем программ для выполнения той или иной функциональной задачи, порядок их активизации и использования осуществляется на основании содержания задачи, нормативных документов, определяющих порядок ее выполнения, состава и характеристик программного обеспечения. Из вышесказанного следует, что изменение списка активных программ на рабочей станции пользователя свидетельствует о переходе к выполнению очередной функциональной задачи. В связи с этим имеется возможность разбиения последовательности событий доступа на фрагменты деятельности пользователя (ФДП), каждый из которых соответствует выполнению некоторого непрерывного этапа функциональной задачи. Формирование ФДП начинается с появления события  $q_a = (\tau_a, d_r)$  и заканчивается с появлением события  $q_b = (\tau_{a+1}, d_s)$ . Последовательность событий доступа, наблюдаемая в интервал времени  $\tau_a \leq \Delta t < \tau_{a+1}$ , определяет содержание ФДП с идентификатором  $d_r$ .

Формирование информационного профиля  $u$ -го пользователя осуществляется путем разбиения множества  $Q^u = \{Q_h\}$  ФДП на множество классов, каждый из которых содержит однородные в смысле близости переходных вероятностей событий доступа фрагменты, где  $h = 1, H^u$  –  $h$ -й ФДП  $u$ -го пользователя. Для проведения классификации каждый фрагмент представляется матрицей вероятностей переходов  $W_h$  входящих в него событий доступа, имеющей следующий вид:

$$W_h = [w_{\alpha\beta}^h] = \begin{bmatrix} w_{11}^h & w_{12}^h & \dots & w_{1J}^h \\ w_{21}^h & w_{22}^h & \dots & w_{2J}^h \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{J1}^h & w_{J2}^h & \dots & w_{JJ}^h \end{bmatrix},$$

где  $w_{\alpha\beta}^h$  – вероятность наблюдения события доступа  $q_\alpha$  после наблюдения события доступа  $q_\beta$  в рамках  $h$ -го ФДП.

Представление матриц вероятностей переходов  $W_h$  в виде векторов  $V_h$ , характеризующих размещение точки в  $J$ -мерном пространстве, позволяет применить

для выявления типовых схем использования информационных ресурсов методы кластерного анализа. В связи с тем, что компоненты вектора  $V_h$  однородны по своему физическому смыслу и одинаково важны с точки зрения решения вопроса об отнесении вектора  $V_h$  к тому или иному классу, в качестве меры близости векторов принято евклидово расстояние

$$\rho(V_a, V_b) = \rho_{ab} = \rho_{ba} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^J (v_\mu^a - v_\mu^b)^2}, \quad (2)$$

где  $\rho(V_a, V_b) = \rho_{ab} = \rho_{ba}$  – расстояние между векторами  $V_a$  и  $V_b$  в евклидовом пространстве;  $v_\mu^a$  –  $\mu$ -й элемент вектора  $V_a$ ;  $v_\mu^b$  –  $\mu$ -й элемент вектора  $V_b$ .

Проведенный анализ методов кластерного анализа показал, что иерархические методы позволяют не только внести структуру в данные, но и описать схемы использования информационных ресурсов с различной степенью детализации в зависимости от шага процедуры (уровня иерархии) на котором получен класс. В основе алгоритмов иерархического кластер-анализа лежит тот или иной критерий качества  $\theta(\Phi^{(k)})$  разбиения, где  $k$  – количество классов, полученных в результате разбиения исходного множества. При этом обычно, если  $k = 2$ , то используются бинарные алгоритмы [7]. В этом случае  $\theta(\Phi^1, \Phi^2)$  имеет смысл близости  $\rho(\Phi^1, \Phi^2)$  между множествами  $\Phi^1$  и  $\Phi^2$ .

Делимые бинарные алгоритмы строятся на принципе деления множества  $Q^u = \{Q_h\}$  ФДП на подмножество  $\Phi_\beta^{(*)} = \{\Phi^1, \Phi^2\}$  такие, что  $(\Phi^1, \Phi^2) = \arg \max_{\Phi^1 \cup \Phi^2 = Q^u} \rho(\Phi^1, \Phi^2)$ , где  $(*)$  – вариант деления исходного множества на два класса, полученный на  $\beta$ -ом шаге кластеризации.

На каждой итерации «родительский» класс разбивается на два подкласса до тех пор, пока не будет выполнено условие останова, либо пока каждый ФДП не образует отдельный класс. Для множества  $Q^u = \{Q_h\}$  ФДП, входящих в «родительский» класс на  $\beta$ -ом шаге кластеризации, могут быть получены различные варианты разбиения на подклассы. В качестве критерия однородности класса  $\Phi_\beta \subset \{V_h\}$  возьмем статистический разброс  $\theta(\Phi_\beta)$  [7]:

$$\theta(\Phi_\beta) = \sum_{h=1}^{H^u} |\Pi^k - V_h|,$$

где  $\Pi^k$  – центр класса  $\Phi^k$ ;  $|\Pi^k - V_h|$  – «манхэттенское» расстояние (среднее разностей между координатами) между центром класса  $\Phi^k$  и элементом класса  $V_h$ . В свою очередь центр класса  $\Phi^k$  определяется в соответствии со следующим выражением [8]:

$$\Pi^k = \frac{1}{|H_k|} \sum_{h=1}^{H_k} V_h, \quad (3)$$

где  $H_k$  – количество элементов множества, отнесенных к классу  $\Phi^k$ .

Положим, что мерой близости между классами является приращение статистического разброса при объединении классов [9]

$$\rho(\Phi^1, \Phi^2) = \theta(\Phi^1 \cup \Phi^2) - \theta(\Phi^1) - \theta(\Phi^2), \Phi^1 \cap \Phi^2 = \emptyset.$$

Тогда из множества вариантов разбиения на классы  $\Phi_\beta^{(*)}$  необходимо выбрать наилучший вариант, соответствующий минимальному значению функционала качества разбиения, определяемый следующим выражением [9]:

$$\theta(\Phi^1, \Phi^2)^{(*)} = \arg \min_{\Phi^1 \cup \Phi^2 = Q} F(\Phi^1, \Phi^2),$$

где  $F(\Phi^1, \Phi^2) = \theta(\Phi^1) + \theta(\Phi^2)$ , где  $\theta(\Phi^1)$  – статистический разброс класса  $\Phi^1$ ;  $\theta(\Phi^2)$  – статистический разброс класса  $\Phi^2$ ;  $F(\Phi^1, \Phi^2)$  – функционал качества разбиения множества  $Q$  ФДП на классы  $\Phi^1$  и  $\Phi^2$  в методе 2-средних.

Кластерный анализ решает задачу внесения структуры в данные. В связи с этим необходимо найти меру качества, которая показывает, насколько хорошо описание из  $k$  классов соответствует данным. Так как аналитическое выражение для оптимального разбиения отсутствует, то невозможно вывести точного решения для распределения данных. При этом можно получить приближительное решение, близкое к оптимальному. В связи с тем, что на каждом шаге кластер-процедуры требуется определить возможность разбиения «родительского» класса на два, применяем следующий критерий останова  $F_{ост}$  [10]:

$$F_{ост} = \frac{w[2]}{w[1]} > F_{крит}, \quad (4)$$

где  $F_{крит}$  – критическое значение критерия останова;  $w[2]$  – сумма квадратов внутрикластерных расстояний в случае распределения ФДП по двум классам;  $w[1]$  – сумма квадратов внутрикластерных расстояний в случае одного класса. В свою очередь сумма квадратов внутрикластерных расстояний определяется в соответствии со следующим выражением [10]:

$$w[k] = \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{a,b \in \Phi^k \\ a \neq b}}^{H_k} \rho_{ab}^2,$$

где  $k = \overline{1, K}$  – количество классов;  $H_k$  – количество ФДП, входящих в класс  $\Phi^k$ ;  $\rho_{ab}^2$  – квадрат внутрикластерного расстояния между элементами класса  $\Phi_k$ .

Гипотеза о существовании единого кластера однородных данных отвергается, если значение критерия  $F_{ост}$  меньше, чем критическое значение  $F_{крит}$ . В свою очередь  $F_{крит}$  определяется следующим выражением [10]:

$$F_{крит} = 1 - \frac{2}{H_p \times J^2} - z_{1-\alpha} \times \sqrt{\frac{2 \times (1 - 8/\pi^2 \times J^2)}{H_p \times J^2}},$$

где  $H_p$  – количество ФДП, подлежащих классификации;  $J$  – число признаков классификации;  $z_{1-\alpha}$  – квантиль стандартного нормального распределения уровня  $(1-\alpha)$ ;  $\alpha$  – уровень значимости при проверке гипотезы.

Процедура классификации на каждом шаге заключается в нахождении наилучшего разбиения множества ФДП на классы  $\Phi_\beta = \{\Phi^1, \Phi^2\}$ , которое отвечает следующему условию:

$$\theta(\Phi_\beta) = \min(\theta(\Phi^1) + \theta(\Phi^2)),$$

где  $\beta$  – цикл кластер-процедуры.

Проверка обоснования разбиения «родительского» класса осуществляется путем проверки выполнения критерия (4). В случае подтверждения гипотезы о существовании во множестве ФДП двух классов осуществляется его разбиение методом 2-средних. Общую последовательность разбиений можно ограничить, отбросив разбиения с мало наполненными кластерами, начиная с некоторого допустимого (порогового) значения информативности  $H_{доп}$ .

Нулевая итерация заключается в выборе двух векторов, которые назначаются центрами кластеров. В рамках предлагаемой кластер-процедуры выбор начальных центров классов осуществляется по результатам предварительной разметки признакового пространства, что позволяет выбрать начальные центры классов, распределенные более равномерно в исходном множестве. Выбор начальных центров классов основан на предварительной (грубой) классификации ФДП на основании анализа геометрического различия графического представления законов распределения событий доступа, входящих в состав ФДП. С этой целью каждому ФДП  $Q_h$  ставится в соответствие величина  $\psi_h$ , характеризующая подобласть исходного множества, в которой расположен соответствующий ей вектор  $V_h$ :

$$\psi_h = \sum_{j=1}^J \left( \sum_{a=1}^j \left( \frac{1}{J} - u(q_a | Q_h) \right) \right),$$

где  $u(q_a | Q_h)$  – относительная частота появления событий доступа  $q_a$  в составе ФДП  $Q_h$ . Из полученных для всех ФДП значений величины  $\psi_h$  находятся минимальное и максимальное значения  $\psi^{\min}$  и  $\psi^{\max}$  указанной величины. Отрезок  $[\psi^{\min}; \psi^{\max}]$  делится на два отрезка одинаковой длины. Формируется два  $\psi^u$  центра отрезков  $\psi^u = \{\psi^{u,1}, \psi^{u,2}\}$ , где  $\psi^{u,k}$  – центр  $k$ -го отрезка. В качестве начального центра  $k$ -го класса выбирается такой ФДП, для которого справедливо:

$$\text{len}(\psi_h, \psi^{u,k}) = \min_{1 \leq h \leq H} \text{len}(\psi_h, \psi^{u,k}),$$

где  $\text{len}(\psi_h, \psi^{u,k})$  – расстояние от  $\psi_h$  до  $\psi^{u,k}$ .

Последующие итерации заключаются в отнесении каждого вектора, из числа оставшихся, к одному из

двух классов по критерию минимума расстояния от центра класса. В качестве меры близости векторов используется евклидово расстояние (2). После отнесения каждого очередного ФДП к классу осуществляется пересчет координат центра  $\Pi_k^{(i)}$  класса  $k$ :

$$\Pi_{k\mu}^{(i)} = \frac{1}{H_k^{(i)}} \sum_{h=1}^{H_k^{(i)}} v_{\mu}^h, \mu = \overline{1, J^2}.$$

Процедура заканчивается, когда все вектора будут распределены по классам. Затем выбираются другие два вектора, которые назначаются центрами классов, и процедура кластеризации повторяется до выполнения условия останова. Множество полученных в каждом цикле кластер-процедуры классов в соответствии с количеством входящих в их состав элементов делится на подмножество информативных классов  $\Phi_{\beta+}$ , у которых  $H_{\beta} \geq H^{\text{доп}}$ , и подмножество неинформативных классов  $\Phi_{\beta-}$ , у которых  $H_{\beta} < H^{\text{доп}}$ . В отношении множества неинформативных классов проводится процедура восстановления, которая заключается в объединении множества  $\Phi_{\beta-}$ , полученных на  $\beta$ -ом цикле кластер-процедуры, невзвешенным центроидным методом с ближайшим информативным классом  $\Phi_{(\beta+)+}$ , полученным на  $(\beta+1)$ -ом цикле. По окончании выполнения процедуры восстановления информативным классам присваивается идентификатор  $\beta$ , соответствующий номеру цикла кластер-процедуры. В результате кластер-процедуры будет получен вариант разбиения исходного множества ФДП  $u$ -го пользователя ВИС на иерархически упорядоченное множество кластеров  $\Phi^u = \{\Phi_{g,\beta}\}$ ,  $g = \overline{1, G_{\beta}}$ ,  $\beta = \overline{1, Z^u}$ , где  $\Phi_{g,\beta} = \{Q_h\}$  –  $g$ -й класс ФДП, полученный на  $\beta$ -ом цикле кластер-процедуры. Каждому классу ставится в соответствие множество идентификаторов ФДП  $D_g = \{d_r\}$ , входящих в состав класса.

Каждый полученный класс ФДП является элементом иерархического информационного профиля пользователя ВИС, содержит однородные в смысле близости вероятностных характеристик элементы и представляет собой типовую устойчивую схему использования пользователем информационных ресурсов ВИС. В качестве эталона для каждого класса принимается матрица вероятностей переходов, соответствующая его центру тяжести (3). Формирование векторов начального распределения вероятностей событий доступа  $C_{g,\beta} = [c_{g,\beta,i}]$  для каждого класса ФДП осуществляется в соответствии с выражением:

$$c_{g,\beta,i} = \frac{1}{H_{g,\beta}} \sum_{Q_h \in \Phi_{g,\beta}} \varphi(Q_h),$$

где  $H_{g,\beta}$  – количество ФДП, входящих в состав класса  $\Phi_{g,\beta}$ ;  $\varphi(Q_h)$  – функция, определяемая следующим образом:

$$\varphi(Q_h) = \begin{cases} 1, & \text{при } q_1 = m, |q_1 \in Q_h, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В результате информационный профиль пользователя  $IP$  содержит элементы  $ip_{g,\beta} = \langle \Lambda_{g,\beta}, D_{g,\beta} \rangle$ , где  $\Lambda_{g,\beta} = [\Pi_{g,\beta}, C_{g,\beta}]$  – Марковская модель класса  $\Phi_{g,\beta}$ ;  $D_{g,\beta}$  – множество идентификаторов ФДП, составляющих класс  $\Phi_{g,\beta}$ ;  $\Pi_{g,\beta}$  – матрица вероятностей переходов, соответствующая центру тяжести класса  $\Phi_{g,\beta}$ .

Различия в функциональных задачах пользователей и особенности процедуры формирования профилей приводят к тому, что профили пользователей имеют различное количество уровней. Это приводит к необходимости нормирования уровней информационных профилей различных пользователей с целью введения единой для ВИС многоуровневой системы контроля доступа. Для решения данной задачи вводится показатель степени безопасности действий пользователя. В связи с особенностями процедуры формирования профилей, наибольшей детализации (наибольший уровень информационного профиля) соответствует максимальный уровень контроля. Если максимальной степени безопасности действий пользователя поставить в соответствие единицу, то показатель степени безопасности действий пользователя, соответствующий уровню иерархии, определяется, как  $C_{\beta}^u = \beta^u / Z^u$ , где:  $\beta^u$  – уровень информационного профиля  $u$ -го пользователя,  $Z^u$  – наибольший номер уровня информационного профиля. В процессе контроля разграничения доступа в качестве эталонов действий пользователя выбираются элементы того уровня иерархического профиля, показатель степени безопасности которого наиболее близок (больше либо равен) заданному системой уровню контроля.

В целях своевременного выявления отклонения параметров наблюдаемой последовательности действий пользователя от полученных в результате формирования информационного профиля целесообразно ввести «контекст» контроля, представляющий собой последовательность событий доступа определенной длины, используемую для сравнения с эталоном. В целях соблюдения требований к достоверности контроля длина контекста контроля выбирается максимально возможной с учетом допустимых значений ошибок первого и второго рода.

Таким образом, применение информационных профилей пользователей позволяет реализовать в системе защиты информации ВИС механизм, обеспечивающий управление доступом к информационным ресурсам в контексте выполняемых пользователями задач, а также корректность их использования. Это позволяет существенно сократить возможности пользователей по нарушению безопасности информации.

### Заключение

В целях контроля выполнения процедур безопасной обработки информации (сравнения текущего состояния процесса обработки информации с эталонными значениями профилей) могут быть применены

методы последовательного анализа данных (обнаружения разладки), а также аппарат теории распознавания образов. Дальнейшие исследования предполагается проводить в следующих направлениях: разграничение доступа в облачных инфраструктурах [11]; применение механизма контроля доступа на основе профилей пользователей в целях проверки корректности настроек политики безопасности; выявление ранее неизвестных угроз безопасности в ВИС.

### Литература

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президентом РФ от 05.12.2016 г. № 646.
2. Котенко, И. В. SIEM-системы для управления информацией и событиями безопасности / И.В. Котенко, И.Б. Саенко // Защита информации. Инсайд. – 2012. – № 5. – С. 54–65.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 13335-4-2007. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 4. Выбор защитных мер. – М.: Стандартинформ, 2007. – 64 с.
4. Авраменко, В. С. Адаптивный контроль защищенности информации от несанкционированного доступа на основе информационных образов / В.С. Авраменко // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2010. – № 2. – С. 45–49.
5. Корт, С. С. Теоретические основы защиты информации: Учебное пособие / С.С. Корт. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 240 с.
6. Тихонов, В. И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.
7. Айвазян, С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1006 с.
8. Мандель, И. Д. Кластерный анализ / И.Д. Мандель. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
9. Уиллиамс, У. Т. Методы иерархической классификации / У.Т. Уиллиамс, Д.Н. Ланс // Статистические методы для ЭВМ / Под ред. М. Б. Малютов. – М.: Наука, 1986. – С. 269–301.
10. Дуда, Р. О. Распознавание образов и анализ сцен / Р.О. Дуда, П.Е. Харт ; под ред. В. Л. Стефанюка. – М.: Мир, 1976. – 511 с.
11. Модель администрирования схем разграничения доступа в облачных инфраструктурах / И.Б. Саенко [и др.] // Информация и Космос. – 2017. – № 1. – С. 121–126.

## Оценка надежности транспортной сети телекоммуникационной системы при использовании систем резервирования

### Assessment of the reliability of the transport network of the telecommunication system at use reservation systems

#### Грязев / Gryazev A.

Андрей Николаевич  
(agryazev@zniis.ru)

кандидат технических наук.  
ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт связи» (ЦНИИС),  
генеральный директор.  
г. Москва

#### Жигadlo / Zhigadlo V.

Валентин Эдуардович  
(Zhigadlo@loniis.ru)

доктор технических наук, доцент.  
Филиал ФГУП ЛО ЦНИИС,  
директор филиала.  
г. Санкт-Петербург

#### Ясинский / Yasinsky S.

Сергей Александрович  
(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.  
Филиал ФГУП ЛО ЦНИИС,  
научный консультант.  
г. Санкт-Петербург

#### Зюзин / Zyuzin A.

Александр Николаевич  
(alexz01@bk.ru)

кандидат технических наук.  
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»  
МО РФ, преподаватель.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunications system; транспортная сеть – transport network; отказоустойчивая структура – protection structure; р-цикл – p-cycle, многоконтурная защитная структура – multi-circuit protective structure; надежность сети связи – reliability of communication network.

В статье производится оценка коэффициента готовности фрагмента сети при использовании различных систем резервирования транспортной сети телекоммуникационной системы в зависимости от изменения коэффициента готовности на каждой линии связи резервируемого сегмента сети и в зависимости от количества линий связи входящих в резервируемый сегмент сети.

The article estimates the availability factor of a network fragment using different reservation systems of the telecommunications system transport network, depending on the change in the availability factor on each communication line of the redundant network segment and depending on the number of communication lines entering the redundant network segment.

Современные транспортные сети телекоммуникационных систем (ТС ТКС) – это сети, обладающие высокой пропускной способностью и использующие в качестве направляющих систем волоконно-оптические линии связи. Поэтому с ростом объемов пере-

даваемой информации на ТС ТКС повреждения на сети приводят к огромным потерям передаваемого трафика. В настоящее время на территории Российской Федерации определены технические нормы на показатели устойчивости функционирования сетей связи [1]. Обеспечить требуемые показатели устойчивости ТС ТКС возможно путем создания и совершенствования соответствующих методов защиты информации от влияния аварий на сетях связи [2]. Классификация существующих методов защиты информационных потоков представлена в таблице 1 [3].

В настоящее время известен метод защиты информационных потоков, существо которого заключается в защитном переключении информационных потоков при аварии на заранее подготовленный сетевой резерв, то есть метод резервирования (*reservation*) потоков (трактов высокого или низкого порядка, оптических каналов, виртуальных соединений при пакетной передаче) и линейных трактов (секций мультиплексирования). Основным достоинством этого метода резервирования является быстрое восстановление связи и минимизация потерь передаваемой информации. Кроме того, существуют методы, которые основаны на поиске ресурса и маршрута передачи информации непосредственно в момент аварии, то есть методы динамического восстановления (*restoration*). Использование таких методов резервирования требует постоянного наличия свободного сетевого резерва либо отмены пере-

дачи низкоприоритетного трафика. В то же время, подобные методы восстановления позволяют серьезно сэкономить на простое свободного сетевого резерва. При этом поиск необходимых ресурсов и расчет нового маршрута требует значительного времени.

Влияние времени осуществления защитного переключения в ТС ТКС на качество услуг связи представлено в таблице 2 [4], а проведенный анализ содержания этой таблицы позволяет сделать вывод, что суммарное время от возникновения аварийной ситуации и до переключения всех сетевых элементов, участвующих в защитном переключении, должно быть не более 200 мс. В этом случае пользователи услуг связи не будут ощущать значительное ухудшение качества связи. Поэтому в настоящее время наиболее распространенными способами защиты ТС ТКС являются методы защитного переключения – резервирования: резервирование линейного тракта (время переключения не более 50 мс) или соединения (время переключения не более 200 мс), которые реализуются по схеме 1+1 и 1:N.

При этом переключение осуществляется на основании статусных команд оборудования: потеря входного сигнала, потеря синхронизации, критическое значение показателя качества принимаемого сигнала, деградация показателя качества принимаемого сигнала. Эти методы защиты нашли реализацию в системах передачи плезиохронной, синхронной цифровой иерархии и оптических транспортных сетей.

В то же время продолжаются исследования методов защитного переключения, которые направлены на

снижение избыточности сетевого резерва с сохранением высоких скоростей переключения. Наиболее интересным методом защитного переключения является вариант сегментного резервирования с защитным переключением на общий резерв, который получил название «механизм резервирования на основе  $p$ -циклов ( $p$ -cycle, *preconfigured protection cycle*)» [5, 6]. Этот вариант основан на известных подходах к резервированию в виде самовосстанавливающихся кольцевых структур (*MS-SPRing – Multiplex Section Shared Protection Ring, SNCP – SubNetwork Connection Protection*). При этом обеспечивается 100% резервирование трафика на определенном сегменте с использованием до 30% меньшего объема ресурсов пропускной способности сегмента ТС ТКС [7]. Суть этого варианта резервирования заключается в выделении на высоко связной топологической структуре замкнутого контура или цикла с предварительно рассчитанной резервной пропускной способностью, которая будет использоваться в случае возникновения отказа в сети связи. Пример структуры системы резервирования ТС ТКС на основе  $p$ -циклов представлен на рисунке 1.

Результаты исследований системы резервирования ТС ТКС на основе  $p$ -циклов подтверждают возможность модификации этой системы с целью снижения избыточности резервной пропускной способности для неравномерных потоковых структур. При этом замкнутый контур с резервной пропускной способностью декомпозируется на линиях, имеющих избыточные резервные пропускные способности, в нескольких

Таблица 1

### Классификация методов защиты информационных потоков

Методы защиты		
Защитное переключение (резервирование потоков, линейных трактов)	Динамическое соединение (перемаршрутизация потоков)	восстановление (перемаршрутизация потоков)
Выделение ресурсов		
По предварительному расчету	По требованию	
Использование ресурсов		
Выделенного резерва 1+1	Общего резерва 1:N	Второстепенного трафика
Расчет резервного маршрута (пути)		
Предварительный расчет	Выбор пути в зависимости от требования по качеству	По требованию
Объект защиты		
Защита пути (защита потока на всей сети)	Защита линейного тракта (участка линейного тракта)	Защита сегмента сети
Управление механизмом защиты		
Автоматическое управление (за счет статусных сигналов оборудования)	Внешними командами управления сетью	системы

Влияние времени защитного переключения ТС ТКС на качество услуг связи

№ п/п	Длительность переключения	Влияние на качество услуг связи
1	50 мс	Перерыва в работе нет: «удар по сервису» 1–2 секунды с ошибками, протокол TCP восстанавливается после 1 ошибочного кадра (фрейма), TCP не разрывает соединение. Большинство TCP соединений не регистрируют перерыв связи.
2	50–200 мс	<5% голосовых соединений разрываются, OKC7 (SS7) отключается, наложенные сервисы (Frame-relay, ATM) переходят в режим перемаршрутизации.
3	200 мс – 2 с	Разрыв коммутируемых соединений, TCP/IP разрывает соединение. (максимальное время переключения для методов динамического восстановления).
4	2–10 с	Все коммутируемые сервисы разрываются. Выделенные каналы регистрируют аварию на линии. Соединения X.25 разрываются. TCP сессии разрываются по предельному времени ожидания. Web страницы не открываются. Протокол «hello» между маршрутизаторами регистрирует аварию.
5	10 с – 5 мин	Все сервисы передачи данных и телефонной связи прекращены. Все сервисы TCP/IP уровня приложений разрываются по предельному времени ожидания. Пользователи начинают массово «перезванивать» и «переподключаться». Маршрутизаторы на всех поврежденных линиях выдают аварию. Сетевые элементы переключают на резервную схему системы синхронизации.
6	5 мин – 30 мин	Небольшие социальные/бизнес последствия. Частичные затруднения в работе глобального «интернета».
7	> 30 мин	Необходимость оповещения клиентов о причинах аварии. Серьезные социальные/бизнес последствия. Авария освещается в новостных лентах. Финансовые потери сервисов бронирования, банковских сервисов и интернет магазинов.

замкнутых контурах с меньшей пропускной способностью, проходящих через различные узлы [8]. Этот способ получил название механизм резервирования на основе многоконтурных защитных структур (МЗС). Пример структуры системы резервирования ТС ТКС на основе МЗС представлен на рис. 2.

При выборе соответствующего метода защиты информационных потоков ТС ТКС важно учитывать не только скорость переключения и объем используемых ресурсов, но и изменение показателя надежности сети электросвязи при использовании выбранного механизма резервирования. Показатели надежности сети электросвязи носят вероятностный характер, и их оценка осуществляется расчетным путем на основе

показателей надежности элементов анализируемой сети связи [9]. В качестве показателя надежности в большинстве случаев используют коэффициент готовности  $K_r$ , который определяется через следующее соотношение:

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_B},$$

где  $T_o$  – среднее время наработки на отказ;  $T_B$  – среднее время восстановления.

Для оценки влияния использования различных механизмов резервирования на надежность сети воспользуемся показателем надежности в виде коэффициента

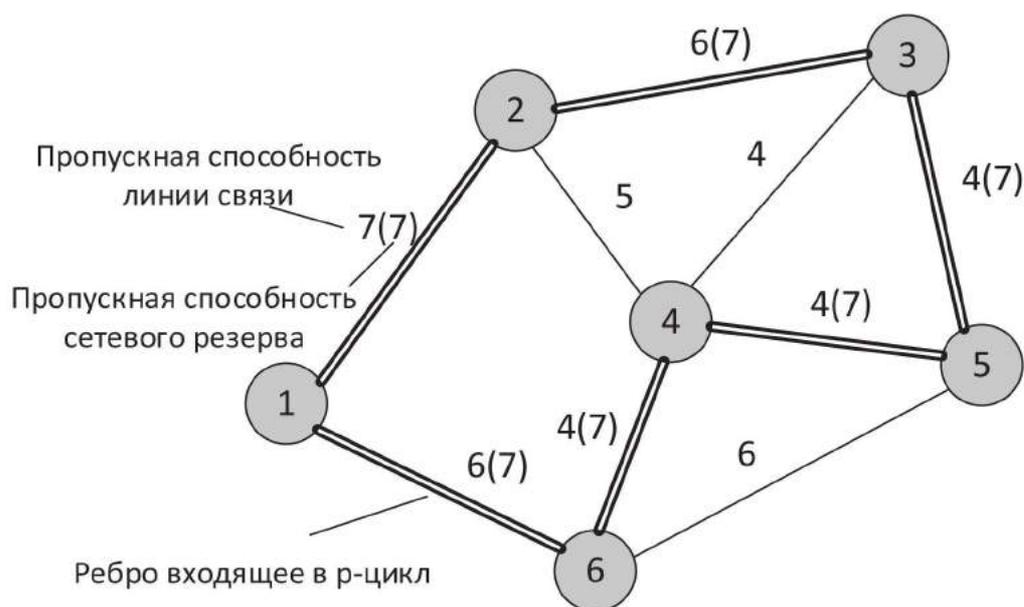


Рис. 1. Пример структуры системы резервирования ТС ТКС на основе р-циклов

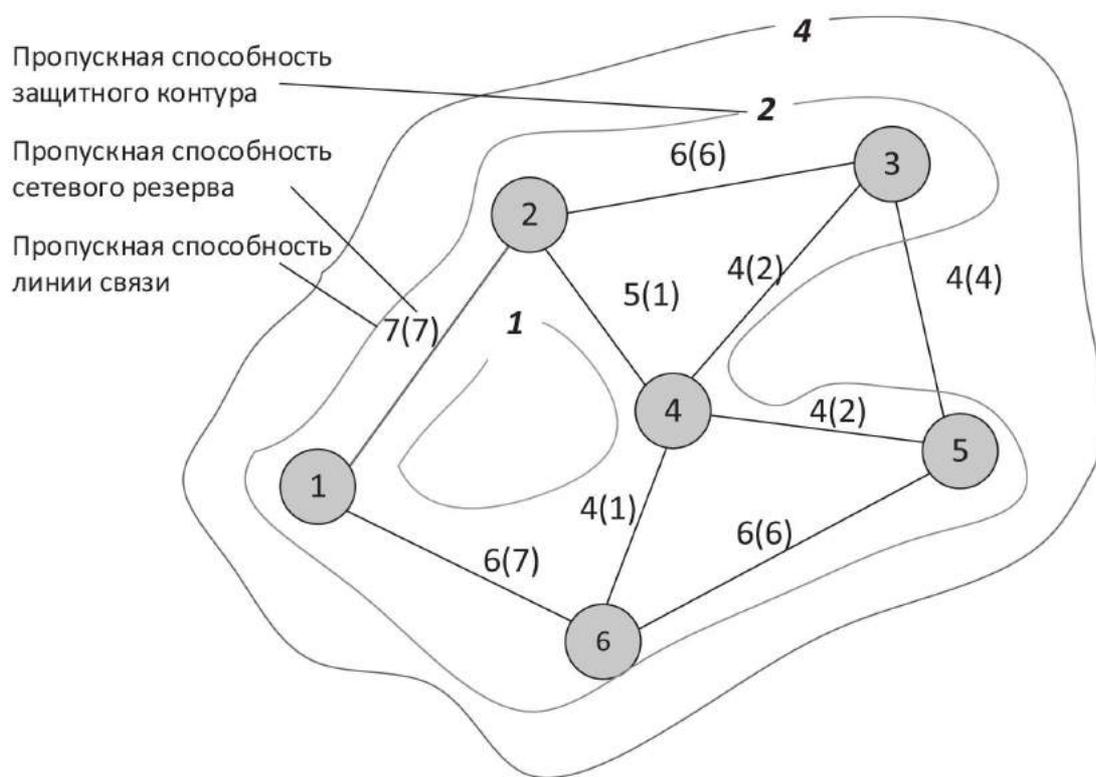


Рис. 2. Пример структуры системы резервирования ТС ТКС на основе МЗС

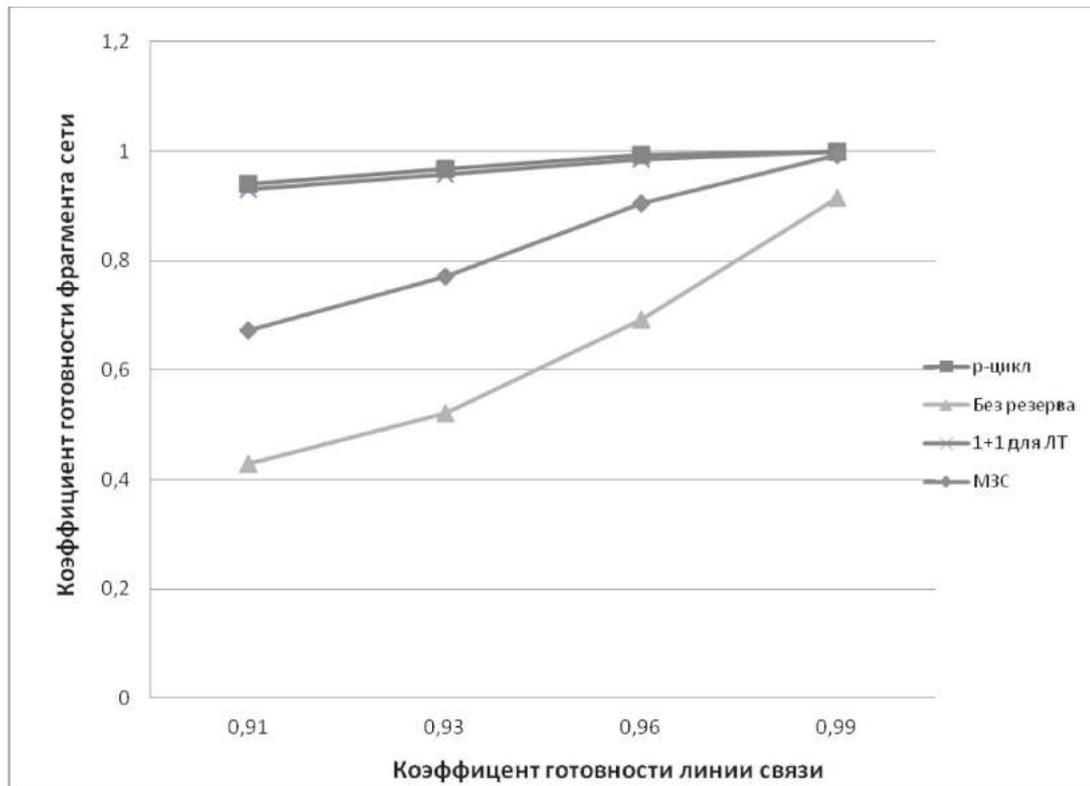


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента готовности фрагмента сети от значения коэффициента готовности линии связи

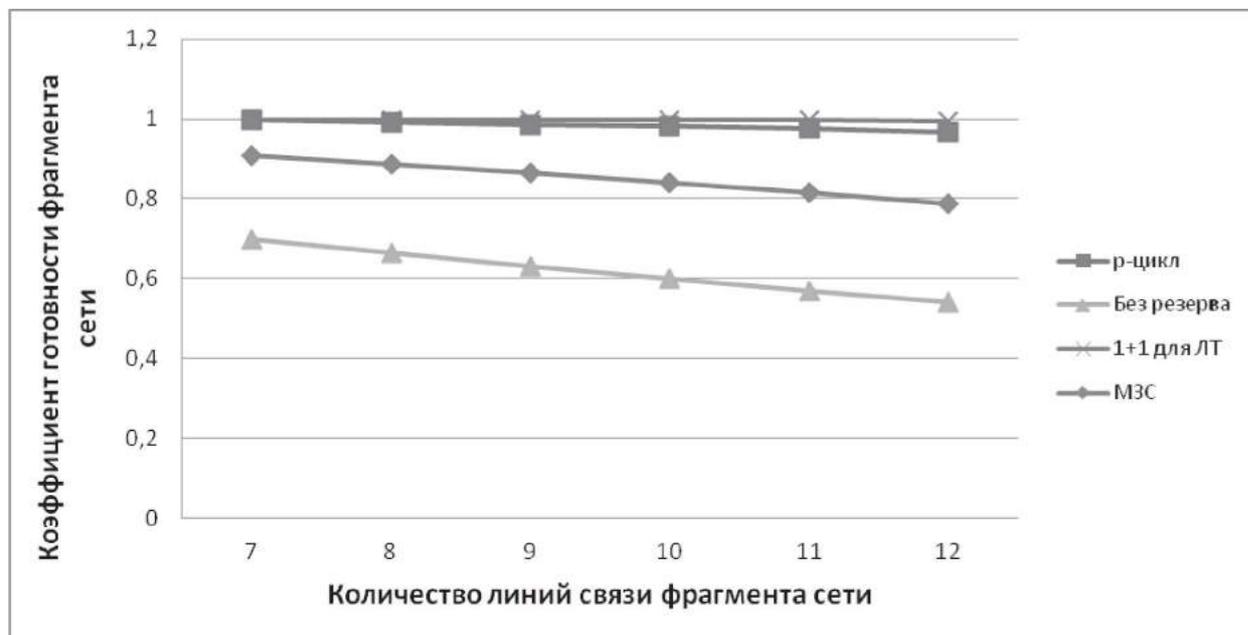


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента готовности фрагмента сети от количества линий связи входящих в резервируемый сегмент сети

ента готовности  $K_r$ . При этом будем полагать, что все узловые, переключающие, передающие и приемные элементы абсолютно надежные, а коэффициент готовности для линий связи  $K_{r\_линии}$  между различными узлами связи одинаковый.

Тогда, в случае отсутствия системы резервирования, коэффициент готовности фрагмента сети будет равен:

$$K_{rc} = \prod_{i=1}^M K_{r\_линии},$$

где  $M$  – количество линий связи на фрагменте сети. В случае организации системы резервирования по схеме 1+1 для каждого линейного тракта (мультиплексной секции) на фрагменте сети коэффициент готовности фрагмента сети будет составлять:

$$K_{rc} = \prod_{i=1}^M (1 - (1 - K_{r\_линии})^2).$$

В случае организации защиты в виде системы защитного переключения на выделенный резерв по схеме 1+1 для защиты потока (подсетевого соединения) коэффициент готовности фрагмента сети будет составлять:

$$K_{rc} = 1 - (1 - \prod_{i=1}^M K_{r\_линии})^2.$$

Для механизма резервирования на основе  $p$ -циклов условие работоспособности системы выполняется в случаях, когда: все линии готовы к работе или авария на защитной линии связи (линия входящая в  $p$ -цикл рис. 1) или две аварии на защищаемых линиях связи. В этом случае коэффициент готовности для фрагмента сети можно рассчитать с помощью следующего выражения:

$$K_{rc} = 1 - (1 - \prod_{i=1}^M K_{r\_линии}) \times (1 - \prod_{i=1}^P K_{r\_линии}) \times (1 - \prod_{i=1}^{M-P} K_{r\_линии})^2,$$

где  $P$  – количество линий входящих в  $p$ -цикл.

В случае организации защитного переключения на основе МЗС система резервирования сможет обеспечить отработку только одной аварии на фрагменте сети, что также соответствует схеме 1+1 для защиты потока.

Графики зависимости коэффициента готовности фрагмента сети от значения коэффициента готовности линии связи, без использования резервирования, при резервировании по схеме 1+1 для линейного тракта, на основе  $p$ -циклов и МЗС представлены на рис. 3.

Анализ графических зависимостей на рис. 3 показывает, что использование механизмов резервирования позволяет значительно увеличить коэффициент готовности фрагмента сети. Однако при уменьшении коэффициента готовности линии связи преимущество системы резервирования 1+1 для линейного тракта и на основе  $p$ -циклов увеличивается.

Графики зависимости коэффициента готовности фрагмента сети от количества линий связи, входящих в резервируемый сегмент сети, без резервирования, при резервировании 1+1 для линейного тракта, на основе  $p$ -циклов и МЗС с одинаковыми значениями коэффициента готовности на каждой линии связи, приведены на рис. 4.

Анализ графических зависимостей на рис. 4 показал, что с увеличением количества линий входящих в резервируемый сегмент сети приводит к уменьшению коэффициента готовности фрагмента сети. При этом коэффициент готовности фрагмента сети при резервировании 1+1 для линейного тракта и на основе  $p$ -циклов при увеличении количества линий связи убывает меньше чем для МЗС. Преимущество схемы резервирования 1+1 для линейного тракта становится явным при количестве линий связи более 10.

Таким образом, в настоящей статье представлены результаты исследований влияния современных механизмов резервирования на надежность ТС ТКС. Проведена оценка коэффициента готовности фрагмента сети без резервирования и с учетом различных вариантов резервирования, которая показала, что использование механизмов резервирования существенно увеличивает надежность сети. Кроме того, использование сегментных методов резервирования ( $p$ -цикл, МЗС) целесообразно на небольших сегментах – до 10 линий связи. При реализации системы резервирования сегмента ТС ТКС необходимо учитывать не только время переключения и избыточность пропускной способности, но и обеспечение требуемых показателей устойчивости ТС ТКС.

## Литература

1. Приказ Мининформсвязи России от 27 сентября 2007 г. № 113 «Об утверждении требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования». [Электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства экономического развития Российской Федерации. – Режим доступа: [http://economy.gov.ru/mines/about/structure/degregulatinginfluence/doc20130301\\_07](http://economy.gov.ru/mines/about/structure/degregulatinginfluence/doc20130301_07), свободный. – Загл. с экрана.
2. Подход к поиску отказоустойчивой структуры транспортной сети телекоммуникационной системы на основе  $p$ -циклов / В.В. Ефимов [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 36–39.
3. Шувалов, В. П. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях / М.М. Егурнов, В.П. Шувалов // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 2. – С. 3–10.
4. Grover, W. D. Mesh-Based Survivable Networks: Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking / W.D. Grover. – Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 2003. – 880 p.
5. New option and insights for survivable transport networks / W.D. Grover [et al.] // IEEE Communications Magazine. – January, 2002. – P. 34–41.
6. Grover, W. D. The Forcer Concept and Express Route Planning in Meshsurvivable Networks / W. D. Grover, D. Y. Li //

Journal of Network and Systems Management. – January, 1999. – Vol. 7, No. 2. – P. 199–223.

7. Зюзин, А. Н. Современные механизмы резервирования и восстановления транспортных сетей связи / А.Н. Зюзин, И.С. Каминецкий // Электросвязь. – 2005. – № 7. – С.18.

8. Ефимов, В. В. Модификация кольцевых механизмов резервирования для неравномерных потоковых структур транспортных сетей связи / В.В. Ефимов, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Электросвязь. – 2016. – № 12. – С. 68–70.

9. ГОСТ Р 53111–2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. –19 с.

## Оценка необходимых и достаточных значений реальной пропускной способности военных систем передачи информации

### Necessary and sufficient values of military system real handling capacity and information transfer assessment

#### Исаков / Isakov Y.

Евгений Евгеньевич  
(isakoveenic@gmail.com)  
доктор технических наук.  
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи  
имени Маршала Советского Союза  
С. М. Буденного» МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),  
старший научный сотрудник.  
г. Санкт-Петербург

#### Мякотин / Myakothin A.

Александр Викторович  
(aleksandrmyakotin@gmail.com)  
доктор технических наук.  
ВАС им. С. М. Буденного,  
профессор кафедры.  
г. Санкт-Петербург

#### Кривцов / Krivtsov S.

Станислав Петрович  
(staskriv@mail.ru)  
ВАС им. С. М. Буденного,  
старший преподаватель кафедры.  
г. Санкт-Петербург

#### Жадан / Zhadan A.

Александр Павлович  
(saha-zhadan87@yandex.ru)  
Первый Государственный испытательный  
космодром МО РФ,  
старший инспектор ревизор.  
г. Мирный, Архангельская область

#### Басулин / Basulin D.

Денис Валерьевич  
(ltybcrf58@gmail.com)  
ВАС им. С. М. Буденного,  
курсант факультета моноканальных  
телекоммуникационных систем связи.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: военные системы передачи информации – military systems of information transfer; пропускная способность – capacity; канал тональной частоты – tone channel; канал связи – communication channel.

В работе приведены примеры нерационального использования значений пропускных способностей каналов тональной частоты в аналоговых системах передачи, что влечет негативные последствия значений показателей устойчивости аналоговой системы передачи. Статья описывает оценки необходимых и достаточных значений реальной пропускной способности военных систем передачи информации с применением в военной связи узкополосных и сверхузкополосных каналов связи, что позволит не только привести в соответствие современным требованиям, но и минимизировать все виды затрат на их производство, развертывание и эксплуатационное обеспечение.

Irrational use examples of handling capacities values with voice-frequency in the analog systems of transfer are given in this work that attracts negative consequences of stability measure of transfer analog system. The article describes assessments of necessary and sufficient values of real handling capacity of military systems of information transfer using military communication of narrow-band and super narrow-band communication channels that will allow not only bringing into compliance with modern requirements but also to minimize all cost types on their production, expansion and operational providing.

Начало XXI века охарактеризовалось переходом ведущих государств к мира к информационному воздействию на системы управления различного назначения. Причина этого – качественный скачок в развитии средств обеспечения управления и обмена информацией на основе информационных и телекоммуникационных технологий[1].

Для военных средств и комплексов связи (ВКС) всегда имела приоритетную значимость объективная количественная оценка необходимых и достаточных для целей устойчивого военного управления значений канальной емкости (пропускной способности) систем передачи информации. Однако из-за отсутствия должной полигонной испытательной базы, предназначенной

для организации комплексных мешающих воздействий состоящим на вооружении и вновь разрабатываемым образцам ВСКС, – подобного рода оценки и поныне продолжают осуществляться на субъективном (практически не подтвержденном) уровне. В результате этого в военной связи оказался запущенным негативный по конечным результатам процесс постепенного наращивания канальной емкости (скоростей передачи информации) ВСКС без каких-либо сопровождающих частных экспериментальных и прогностических оценок в количественных изменениях текущих значений их устойчивости ( $P_y$ ).

Не стал исключением из этого «правила» и последний цикл, начало которому было положено в начале этого века. При этом в его рамках, в отличие от прошлых циклов перевооружений, было предусмотрено скачкообразное по сути наращивание канальной емкости (технической пропускной способности, значений  $C_T$ ) спланированных на перспективу ВСКС и одновременно для всех основных уровней военного управления.

Существование такого наращивания было сведено к одновременной и радикальной замене на основных уровнях военного управления прежних аналоговых каналов в составе аналоговых систем передачи (АСП) с полосами частот  $\Delta f \approx 3$  кГц, – на особо широкополосные цифровые каналы и системы передачи, начиная от основного цифрового канала (ОЦК) ЦСП с штатной полосой  $\Delta f \approx 400$  кГц, до цифровых каналов с еще большей кратностью (2, 4, 8, 16, 32, 64 и т.д.).

Фактически это послужило еще одним дополнительным свидетельством того, что в военной связи, как в прошлых, так и в нынешних программах вооружений, по-прежнему не учитываются в должной мере наличие и содержание особо многообразных и многопараметрических функциональных зависимостей в рамках ВСКС между их пропускной способностью.

В связи с вышеизложенным, становится актуальной следующая постановка вопроса:

«В рамках каких количественных значений  $C_{T\text{ ОПТ}}$  ( $N_{K\text{ ОПТ}}$ ) должна реализовываться военная связь для обеспечения должных компромиссных соотношений между ее устойчивостью ( $P_y$ ) и пропускной способностью ( $C_T$ )».

Основной причиной нынешнего отсутствия содержательного ответа на подобного рода постановку вопроса продолжает служить отсутствие в военной связи должной базы для проведения комплексных испытаний на устойчивость разрабатываемых и принимаемых на вооружение ВСКС.

Вероятно, что на «осознание» необходимости наличия подобного рода базы, на ее создание, на последующее качественное развитие и на проведение соответствующих комплексных натурных испытаний опытных образцов ВСКС с учетом быстро прогрессирующих функциональных свойств современных средств информационного противоборства (ИП) может потребоваться достаточно много времени (реальных «подвижек» по

этой части в настоящем пока не просматривается).

Вместе с тем сам процесс создания нового поколения ВСКС под приоритетные требования к типам сигналов электросвязи (цифровые) и к значениям их канальной емкости ( $C_T$ ) уже оказался запущенным. При этом в основу обоснования и содержания таких планов были положены утверждения о том, что «аналоговые системы передачи морально и физически устарели, не имеют реальных перспектив для дальнейшего их развития».

По аналогии с национальной гражданской связью, практически не использующую АСП и часть кабельной сети страны (с ее общей протяженностью более 1 млн. км), также реже используются и проводные симметричные линии военной связи с их общей протяженностью более 80 тысяч километров.

Однако с переходом гражданской связи на цифровые системы передачи (ЦСП) с применением волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) она получила «взамен» массу новых реальных угроз от возможных внешних источников преднамеренных воздействий. Связано это с возможными внешними «принудительными» нарушениями конфигурации цифровых сетей связи и режимов их работы, с несанкционированным управлением сопряженных с ними ведомственными (военными) сетями связи, с принудительными нарушениями синхронизации, с вводом ложной информации, с несанкционированным отключением аппаратуры и каналов связи, с выводом ее из строя под воздействием электромагнитных импульсов (ЭМИ) и пр.

В результате появления подобного рода угроз (возможных внезапных по времени и месту кибератак), построенная на основе ЦСП гражданская система связи перестала служить должной опорой для военной связи, как это было в прошлом при ее построении на основе аналоговых (электрически независимых) систем передачи (АСП).

Вызывают сомнения и существующие ныне планы построения на территории РФ военной выделенной цифровой сети связи на основе ВОЛС. Связано это не только с особо высокой стоимостью подобного рода проекта, но и с потенциально низкой устойчивостью самой военной связи по таким линиям и сетям из-за наличия практически неразрешимых проблем в области их телекоммуникационной безопасности и потенциально низкой их защищенности различного рода от поражающих факторов, включая и ЭМИ.

Что же касается нынешней стационарной и мобильной компонентов военной связи, то основу их канального, узлового и линейного оборудования по-прежнему продолжают составлять АСП, хотя промышленный выпуск их каналообразующей части реально был прекращен уже более 40 лет тому назад [2].

Основными причинами их низкой устойчивости служат принятые в прошлом два подхода:

1) Построение АСП под принудительно задаваемые со стороны органов военного управления несоразмерно

высокие (в ущерб устойчивости ВСКС) требования к числу их типовых каналов связи (десятки–сотни), что послужило основными причинами усложнения мобильной и стационарной компонентов военной связи.

2) Реализация фильтровой части оборудования АСП на дорогостоящих и особо громоздких *LC* компонентах. Произошло это вопреки уже известным национальным специалистам ещё в 70-х годах прошлого века принципам построения фильтровой части оборудования АСП на так называемых способах цифровой обработки сигналов (ЦОС) с уникальными оперативно-техническими и иными свойствами (позволяют многократно, в десятки раз, уменьшить массогабаритные показатели и энергопотребление применяемого телекоммуникационного оборудования и практически реализовать АСП с уникальными оперативно-техническими и иными свойствами).

Несомненно, что негативную значимость здесь имело ранее и продолжает иметь отсутствие по настоящее время в интересах военной связи структуры Генеральных конструкторов, ответственных как за взаимосвязанное построение базовых образцов средств проводной, коротковолновой, ультракоротковолновой, радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи, так и за учет их должного взаимодействия с разработчиками национальных средств и комплексов радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Еще тогда, в рамках прошлого промышленного производства АСП, военная связь так и не приобрела совокупность качественно новых для нее оперативно-технических свойств в части автоматизированного управления числом предоставляемых абонентам каналов связи ( $N_K$ ), их полосами частот ( $\Delta f$ ), их амплитудами ( $\Delta U_f$ ), их местоположением оси частот ( $F_f$ ) и др.

Именно тогда (на стыке 60–70-х годов прошлого века) перестали развиваться способы для возможного построения военной мобильной и стационарной компонентов военной связи на основе АСП с ЦОС с гибкими оперативными функциями под приоритетные требования к значениям их устойчивости.

Этому же способствовали и принятые в последующие годы аналогичные для гражданской связи решения по радикальной замене в военной связи АСП на многоканальные и требующие больших ресурсов (полосовых, частотных и энергетических) ЦСП.

Существенным свойством морфологического подхода является его направленность на поиск полноты и общности вариантов. Он позволяет систематически выявить всю полноту возможных вариантов построения ПТСС СН [4].

В силу отмеченных выше причин это позволяет утверждать, что отечественная военная связь ныне продолжает находиться на не самом рациональном витке своего развития.

Подтверждением этому служит недостаточное понимание, что вопреки нынешнему принципу «чем больше число каналов связи и чем выше скорости передачи

информации – «тем лучше», военная связь необходимо строить под приоритетом требований к значениям ее устойчивости.

Следует особо отметить, что при расчете достаточного числа каналов, или скоростей передачи информации под цели устойчивого военного управления в полной мере должны учитываться ограниченные физиологические возможности должностных лиц. Подобного рода учет давно и успешно принимается во внимание и расчет во многих сферах человеческой деятельности, именно такой учет только и позволяет создать должные технологические, технические, оперативные и иные предпосылки для рационального построения ВСКС с востребованными значениями устойчивости, для военной, экономической, эксплуатационной и иной эффективности.

Основой для такого учета и расчета служат известные положения о том, что «пропускная способность» («ПС») человека, т.е. максимальная скорость (бит/сек), с которой он может принимать и передавать информацию без его перегрузки, находится в пределах 3–10 бит/с.

Зона перегрузки составляет 20–100 бит/с, хотя при чтении про себя она может составлять 40–50 бит/с. При печати на клавиатуре такая скорость обычно составляет 14–26 бит/с.

Если же время выполнения оператором отдельных действий складывается из времени приема информации, ее анализа и переработки, осуществления управляющих воздействий, то на восприятие, например семизначного числа, затрачивается 1,2 с, на чтение слова из 10 букв  $\approx 0,03$  с, на набор на клавиатуре дисплея одного знака  $\approx 0,6$  с, выдачу команды голосом (5–6 слов) – 3 с.

Максимальное значение потока информации, который может обработать человек, лежит в районе 50 бит/с.

Максимальное значение информации, передаваемой человеком в разных видах деятельности, составляет: громкое чтение – 30 бит/с, корректорская работа – 18 бит/с, сложение двух цифр – 12 бит/с, счет предметов – 3 бит/с.

Если же темпы поступления входной информации превышают выше приведенные значения и продолжают длительное время, то наступает стрессовый срыв деятельности оператора, вплоть до угрозы его здоровью.

Из сравнения приведенных выше данных со значениями возможных скоростей передачи информации на уровне отдельно взятых типовых каналов ТЧ АСП (обычно составляют  $C \approx 30$ –40 кбит/с), неизбежно следует вывод, что заложенные в них ресурсные возможности по скоростям (объемам) передачи информации более, чем на 1–2 порядка превышают фактические значения скоростей обмена информацией, обычно реализуемых на уровне реальных операторов связи. Именно этим объясняется, например, тот факт, что для каналов ТЧ АСП разработаны дополнительные «приставки» (напр. аппаратура цифрового уплотнения каналов – АЦУК; которая построена с применением методов

ЦОС), обеспечивающих одновременную передачу по одному каналу ТЧ АСП до 4–8 и каналов связи коммерческого качества.

Именно для этих целей ныне существуют на национальном рынке зарубежные промышленные модемы типа *Robotics 56k*, *STX* и другие, рассчитанные на скорости передачи информации по таким каналам до 40–50 кбит/сек.

Это означает, что техническая пропускная способность типовых каналов ТЧ АСП (в значениях  $C_T$  бит/с) ныне реально задействуется на многократно меньшие значения.

Нерационально используется номинальная пропускная способность каналов ТЧ АСП и с применением 12-канальной аппаратуры тонального телеграфирования ( $C_T$ ) с суммарной скоростью передачи всего лишь в  $C_p \approx 600$  бит/с.

Не составляют здесь исключения и штатные средства многоканальной засекреченной связи в интересах до 6 абонентов одновременно. Построены они на тех же технологиях ЦОС и располагают суммарной (реальной,  $C_p$ ) скоростью передачи по одному каналу ТЧ АСП до 20 кбит/с, что составляет  $\approx 30\%$  от его номинальной пропускной способности.

Вышеизложенное означает, что в результате применения в военной связи АСП со штатными значениями полосы частот каналов связи ( $\Delta f = 3.1$  кГц) и числа самих каналов (обычно: 6, 12, 24, 60), реально имело ранее и продолжает иметь крайне расточительное и неэффективное (в ущерб требуемым значениям их устойчивости) использование технической пропускной способности (значений  $C_T$ ) как аналоговых каналов связи, так и аналоговых систем передачи в целом.

Негативными последствиями этого продолжают служить заниженные значения показателей устойчивости как АСП, так и военной связи в целом.

В случае промышленной реализации парка АСП на методах ЦОС (цифро-аналоговых систем передачи с предлагаемой аббревиатурой ЦАСП) становится возможным его построение с гибкими свойствами в части качественного согласования пропускной способности каналов связи (по их числу и полосам частот) с функциональными возможностями самих операторов связи.

В таких случаях станет возможным предоставление абонентам каналов связи с полосами частот, начиная от нескольких Гц и с вариацией их размещения на оси частот.

Благодаря этому не исключаются возможности и для встречной работы таких средств с нынешним парком АСП, располагающим штатным размещением каналов связи на оси частот и штатными полосами частот (3100 Гц). Поэтому можно утверждать, что в случае промышленной разработки парка ЦААК открываются качественно новые возможности для построения ВСКС, военных линейных и сетевых структур с требуемыми значениями устойчивости.

В процессе построения и проектирования повседневных пунктов управления ключевую роль играет построение абонентских и внутренних сетей связи таким образом, чтобы должностные лица повседневного пункта управления могли в полном объеме использовать все возможности сети связи, а также с максимальным удобством пользоваться теми услугами связи, которые она может им предоставить. В связи этим стоит актуальный вопрос по расчёту состава внутренней телекоммуникационной сети связи повседневного пункта управления, который включает в себя 2 этапа [3].

На основе таких методов и средств вполне разрешимыми становятся задачи построения абонентской аппаратуры открытой телефонной связи с полосами частот всего в 50–100 Гц (с удельными скоростями передачи в 10–20 бит/Гц, засекреченной связи с полосами частот до 100–200 Гц).

Это означает, что востребованная под такую связь суммарная полоса частот на уровне 50–100 автономных информационных направлений не превысит всего нескольких кГц. Поэтому, например, на уровне полевой компоненты отпадет необходимость в применении громоздких узлов связи многоаппаратного состава с сопровождающей их проблематикой в области устойчивости.

Применение в военной связи узкополосных и сверхузкополосных каналов связи, организованных с учетом «ПС» самих операторов связи позволит не только привести в соответствие современным требованиям основные оперативно-технические и эксплуатационные характеристики ВСКС, но и минимизировать все виды затрат на их производство, развертывание и эксплуатационное обеспечение.

## Литература

1. Коцыняк, М. А. Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей / М.А. Коцыняк, И.А. Кулешов, О.С. Лаута. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 91 с.
2. Кривцов С.П. Методика расчёта количества оборудования и линий связи при построении сети внутренней телекоммуникационной связи на повседневном пункте управления / С.П. Кривцов // Труды учебных заведений связи. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 87–92.
3. Акимова, Л. А. Морфологическая модель полевой транспортной сети связи специального назначения / Л.А. Акимова, О.П. Жадан, И.Г. Стахеев // Труды учебных заведений связи. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 10–16.

# Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования

## The analysis of ADS-B signals energy availability to low-space satellites with use of statistical modeling

**Скореходов / Skorokhodov Y.**

Ярослав Анатольевич

(yaroslavskor@gmail.com)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского»

(ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ,

начальник лаборатории (НИ) ВИ(НИ).

г. Санкт-Петербург

**Мальшев / Malyshev D.**

Денис Владимирович

(demalyshev@yandex.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

начальник лаборатории (НИ) ВИ(НИ).

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** системы авиационного наблюдения – aviation surveillance systems; автоматическое зависимое наблюдение в режиме радиовещания – automatic dependent surveillance-broadcast; обработка информации – information processing; статистическое моделирование – statistical modeling.

В статье представлены результаты анализа энергетической доступности системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов. Отличительной особенностью предложенного подхода является использование статистических и имитационных моделей, что позволяет рассчитывать бюджет канала передачи информации и моделировать прием сообщений с учетом различных факторов: расстояния, времени на распространение, диаграммы направленности, эффекта Доплера, расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, вероятности безошибочного приема сообщений. Получены экстремальные значения мощности сигнала на входе детектора для заданной высоты орбиты при различных значениях мощности передатчика и запаса по мощности для различных значений чувствительности радиоприемного устройства, а также зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения) воздушных судов от региона наблюдения.

The article presents the results of the ADS-B system energy availability analysis for low-Earth orbit satellites. A main feature of the proposed approach is the use of statistical and simulation models. This made it possible to take into account various factors in the calculating of the information transfer channel budget and simulate receiving messages: distance, propagation time, radiation patterns, Doppler effect, divergence of transmitting and receiving antennas polarization planes, probability of error-free reception of messages. Signal power extreme values at the detector input for a given orbit height for different transmitter power and power margin values for different sensitivity values of the radio receiving device was obtained. Dependence of the available aircraft number (from the energy point of view) from the monitoring region was also obtained.

### Введение

В настоящее время рядом развитых стран широко внедряются спутниковые системы слежения за воздушным движением, основанные на приеме и ретрансляции сигналов системы АЗН-В (автоматическое зависимое наблюдение в режиме радиовещания). АЗН-В представляет собой систему авиационного наблюдения, предназначенную для контроля и обеспечения безопасности движения воздушных судов и является элементом современной аэронавигационной инфраструктуры. Как и ряд других подобных систем (вторичный обзорный радиолокатор, мультилатерация), АЗН-В позволяет более эффективно использовать воздушное пространство.

Наблюдение за воздушным движением с использованием наземных пунктов не позволяет осуществлять контроль состояния воздушных судов в удаленных регионах (расположенных на расстоянии более 400 км от береговых линий) и оперативно реагировать на возникновение нештатных и аварийных ситуаций. Как правило, время поступления сообщений ADS-C (от англ. «Automatic dependent surveillance – contract» – автоматическое зависимое наблюдение с ограниченным доступом) от самолетов, движущихся в океаническом воздушном пространстве, составляет от 15 до 25 минут [1], сообщений ACARS (от англ. «Aircraft Communications Addressing and Reporting System» – адресно-отчетная система авиационной связи) – 10 минут. За десятиминутный интервал времени воздушные суда пролетают около 150 км, что не позволяет принимать своевременные решения, а причины ряда аварийных ситуаций и катастроф до сих пор остаются неизвестными.

Развертывание орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) с возможностью приема,

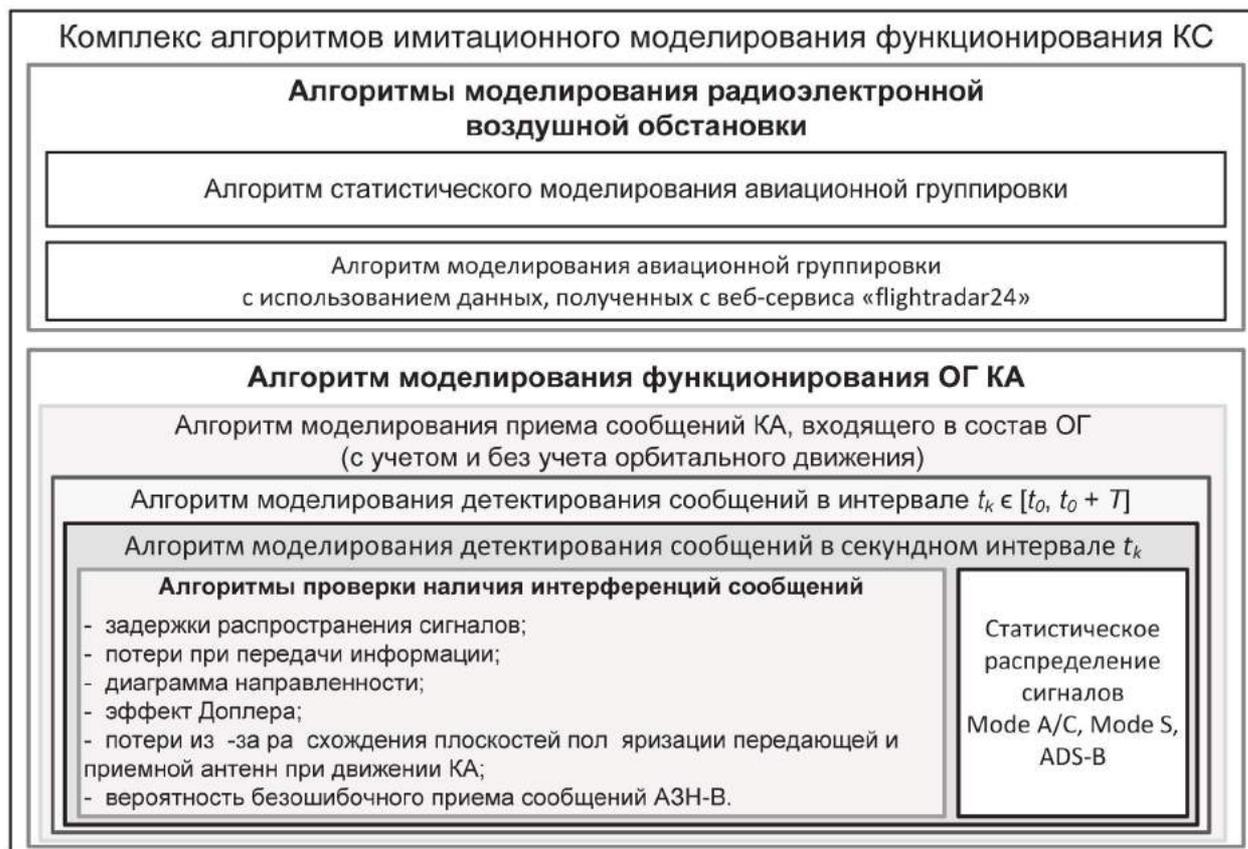


Рис. 1. Комплекс алгоритмов имитационного моделирования функционирования космической системы

обработки и ретрансляции сигналов АЗН-В позволит осуществлять непрерывный мониторинг движения воздушных судов в глобальном масштабе. В связи с тем, что при разработке системы не предполагалось осуществлять прием сигналов на борту КА, существуют определенные проблемы, связанные с их энергетической доступностью, наличием коллизий сообщений, влиянием эффекта Доплера и др.

Цель настоящего исследования заключается в оценке энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных КА. В большинстве случаев энергетические параметры сигналов представляют в форме зависимостей ослабления по мощности сигналов от дальности и/или с учетом чувствительности приемника и вида модуляции в форме зависимостей вероятности битовой или пакетной ошибки (они являются взаимнооднозначны) от уровня сигнал/шум. В данном случае учитывается один фактор (расстояние между транспондером и приемником сообщений), а при определении потерь передачи антенны принимаются изотропными.

В статье представлены результаты вычислений запаса по мощности сигналов АЗН-В для заданной высоты орбиты с использованием методов статистического моделирования. Отличим предложенного подхода

от классического, в котором учитывается только ослабление мощности сигнала при его распространении в свободном пространстве, является возможность варьировать системой ограничений и допущений в зависимости от целей моделирования. Это достигается благодаря применению новой методики анализа энергетической доступности на основе методов статистического и имитационного моделирования.

### Имитационная модель функционирования космической системы контроля движения воздушных судов

Модель функционирования космической системы контроля движения воздушных судов, включающая частные модели: модель ОГ КА, модель орбитального движения, модель воздушной радиоэлектронной обстановки, модели приемопередающих устройств сигналов АЗН-В, реализована в виде комплекса алгоритмов, взаимосвязь которых схематически изображена на рис. 1.

Разработанный комплекс алгоритмов позволяет задавать различные ограничения и допущения (расстояние, время на распространение, диаграмма направленности, эффект Доплера, расхождение плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, веро-

ятность безошибочного приема сообщения) и получать оценки целевых показателей функционирования космической системы (КС) в условиях, максимально приближенных к действительности.

Представленная модель функционирования КС может быть использована для решения следующих задач:

- оценивания количественных показателей обнаружения судов для заданной структуры ОГ КА;
- выбора параметров ОГ КА для заданных показателей обнаружения морских судов;
- оценивания энергетической доступности сигналов для различных параметров орбитального движения КА и других условий (с учетом различных допущения и ограничения при моделировании).

В данной работе модель использовалась для расчета статистических характеристик энергетических параметров сигналов системы АЗН-В.

### Оценивание статистических характеристик энергетических параметров сигналов системы АЗН-В

Предлагаются два сценария проведения моделирования. В первом случае используется статическая модель функционирования КС и предполагается равномерное распределение воздушных судов в зоне обзора КА, что позволит оценить экстремальные (минимальное и максимальное) значения мощности сигнала на входе детектора при различных значениях мощности передатчика и запас по мощности с учетом различных значений чувствительности радиоприемного устройства. Во втором случае используется модель КА с учетом орбитального движения и радиоэлектронной

обстановки в мировом воздушном пространстве, что дает возможность получить зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения) судов от региона наблюдения.

1. Воздушные суда распределены равномерно в зоне обзора КА на высоте 10 км над земной поверхностью. Модель Земли – ОЗЭ–1990 (большая полуось  $a = 6378136$  м., коэффициент сжатия  $\alpha = 1/298,258$ ).

Статистические характеристики энергетических параметров сигналов системы АЗН-В для КА на круговой орбите с высотой  $h = 300$  км представлены в таблице 1.

В таблице в графе «Запас по мощности» через черту указаны значения для приемников с чувствительностями  $-134$  и  $-117$  дБ соответственно [2]. Значения получены путем статистического анализа энергетических характеристик переданных сигналов объектами, равномерно распределенными в зоне обзора КА. Из анализа таблицы видно, что на границе зоны видимости КА сигналы являются энергетически недоступными как для приемника с чувствительностью  $-117$  дБ, так и с  $-134$  дБ. В лучшем случае для приемников с чувствительностью  $-134$  дБ имеется гарантированный запас мощности для любого класса передающих устройств, для приемников с чувствительностью  $-117$  дБ сигналы являются практически недоступными, для передатчиков мощностью 29 дБ запас составляет всего 4 дБ, что соответствует низкой вероятности безошибочного приема сообщений.

2. Моделирование движения КА – приемника сигналов АЗН-В с параметрами орбиты: долгота восходящего узла  $\Omega = 0$  град.; наклонение  $i = 98$  град.; апогей  $r_A = 300$  км.; перигей  $r_P = 300$  км.; широта перицентра  $\omega = 0$  град. Интервал моделирования составляет сутки (86400 с.), время  $t_0$  начала моделирования соответствует поло-

Таблица 1

Статистические характеристики энергетических параметров сигналов системы АЗН-В

Характеристика	Минимум	Максимум	
Суммарные потери, дБ	-181,22	-141,73	
Расстояние $d(s_i, r_j)$ от источника $s_i$ до приемника $r_j$ , км	6468,29	427,516	
Потери мощности на распространение $L_1(d_{ij}, f)$ , дБ	-169,364	-145,768	
Угол возвышения над горизонтом, град	-27,47	43,13	
Коэффициент усиления антенны, дБ	-5,99	4,03	
Угол между плоскостями поляризации приемной и передающей антенн $\phi(s_i, r_j)$ , град.	59,39	2,68	
Потери из-за расхождения плоскостей поляризации приемной и передающей антенн $L_2(\Phi_{ij})$ , дБ	-5,86	-0,001	
Запас по мощности, дБ	21	-26/-43	13,27/-3,73
	24	-23/-40	16,27/-0,73
	27	-20/-37	19,27/2,27
	29	-18/-35	21,27/4,27

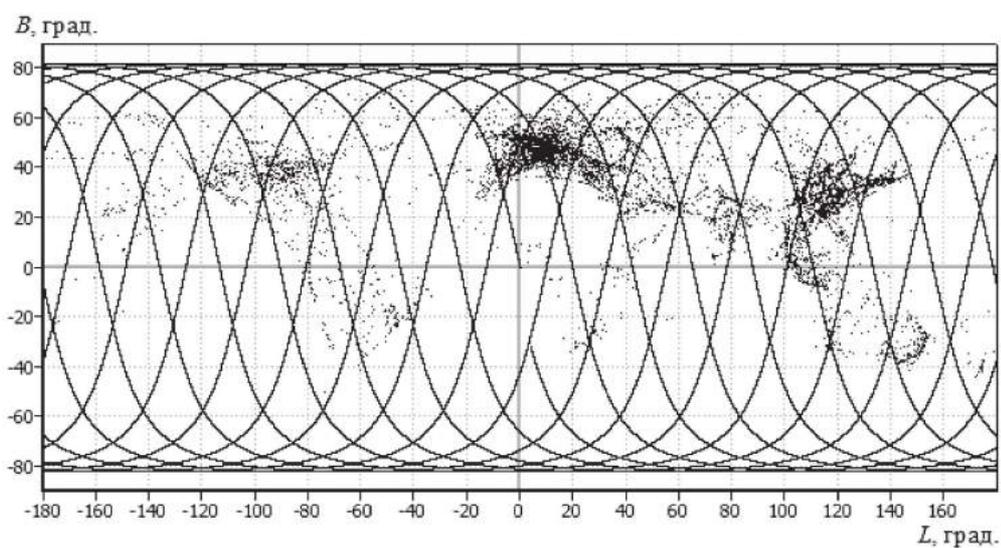


Рис. 2. Воздушная радиоэлектронная обстановка в мире

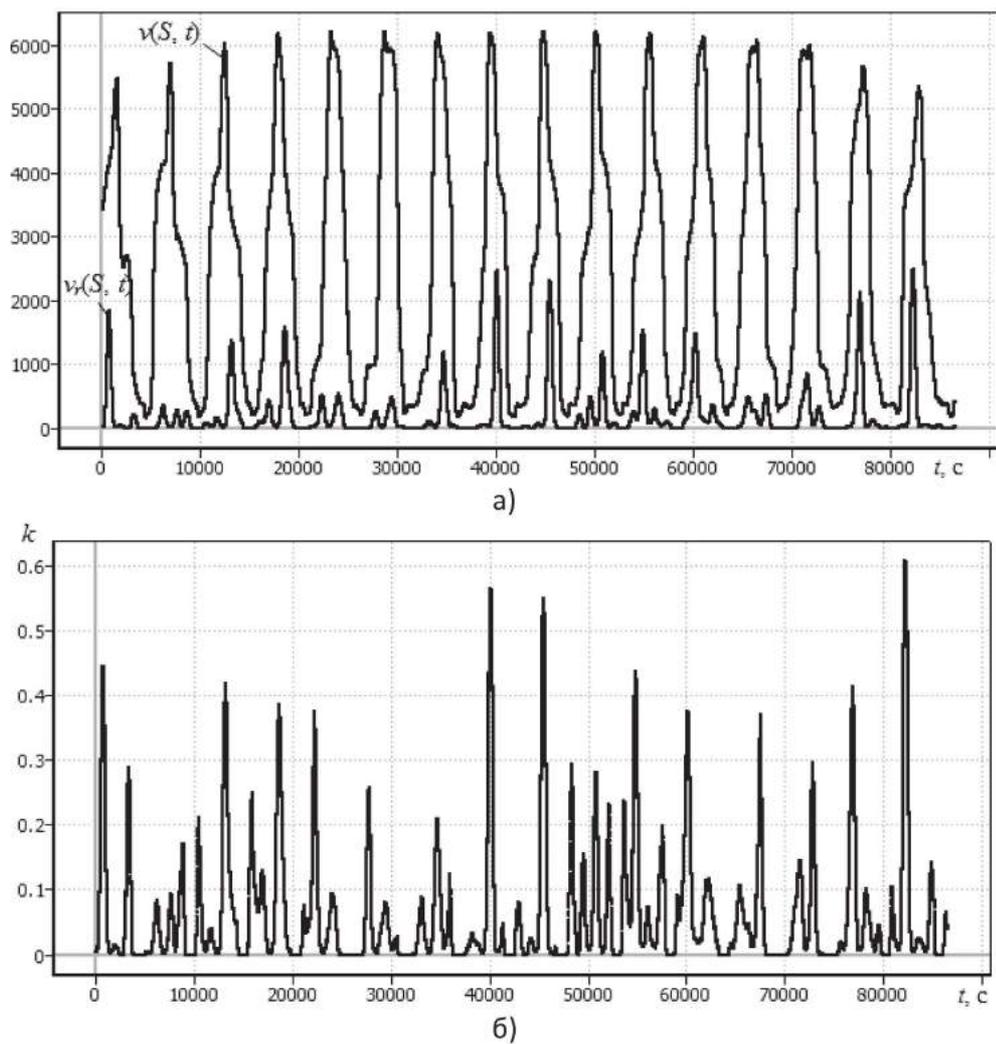


Рис. 3. Анализ радиовидимости: а) – количество судов  $\nu(S, t)$ , попавших в зону обзора КА, и судов  $\nu_r(S, t)$  в зоне обзора с учетом энергетической доступности; б) – коэффициент энергетической доступности

жению КА на орбите с истинной аномалией  $\theta_0 = 0$  град.

Данные о местоположении воздушных судов (координаты в геодезической сферической системе координат), их скорости и курса передвижения получены с веб-сервера «Flightradar24» (<https://www.flightradar24.com>) на заданный момент времени. Представленная модель размещения источников излучений сигналов АЗН-В позволяет учитывать неоднородность размещения воздушных судов в мировом воздушном пространстве.

Модель воздушной радиоэлектронной обстановки, включающая около 8 тыс. источников излучений сигналов АЗН-В, и трасса полета КА с заданными параметрами орбиты изображены на рис. 2.

На рис. 3-а изображены графики количества судов  $v(S, t)$ , находящихся в зоне обзора КА  $r_j$  в момент времени  $t$ , и количества судов  $v_r(S, t)$ , находящихся в зоне обзора КА с учетом их энергетической доступности. График зависимости коэффициента энергетической доступности  $k = v_r(S, t)/v(S, t)$  от текущего положения КА на орбите изображен на рис. 3-б.

Из анализа графика на рис. 3-б видно, что коэффициент энергетической доступности не превосходит 60%. При проведении моделирования пороговое значение ослабления по мощности сигналов принималось равным  $-117$  дБм. В то время как в зоне обзора КА наблюдается свыше 6000 судов, доступными (с энергетической точки зрения) будет не более 2500. Тем не менее это достаточно большое количество и, учитывая загруженность канала другими типами сообщений (Mode A/C, Mode S) [3], требуются схемно-технические решения (например, пространственно-разнесенного приема), чтобы снизить вероятность интерференций сообщений.

## Заключение

В работе представлены результаты анализа энергетической доступности сигналов АЗН-В для низкоорбитальных КА. В отличие от классического подхода, в котором энергетические параметры сигналов представляют в форме зависимостей вероятности безошибочного приема сообщений от дальности источника излучений, в подходе на основе статистического моделирования учитывается комплекс факторов (расстояние, время на распространение, диаграмма направленности, эффект Доплера, расхождение плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, вероятность безошибочного приема сообщения), которые существенно влияют на энергетическую доступность переданных сигналов и безошибочный прием сообщений.

Показано, что для радиоприемных устройств с чувствительностью  $-134$  дБ в лучшем случае (взаимном расположении источника и получателя сигналов) имеется гарантированный запас мощности для любого класса передающих устройств, что позволяет осуществлять регистрацию и декодирование сообщений системы АЗН-В на борту КА. Получена зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения)

воздушных судов от текущего положения КА для заданной орбиты. В ряде регионах для уменьшения вероятности возникновения коллизии сообщений требуются дополнительные схемно-технические решения.

## Литература

1. Динамические статистические исследования по спутниковому приему сигнала ADS-B для глобального слежения за рейсами гражданской авиации // Всемирная конференция радиосвязи. – Женева, Швейцария. – 2015. – 19 с.
2. Werner, K. ADS-B over Satellite. Global air traffic surveillance from space / K. Werner, J. Bredemeyer, T. Delovski // Digital communications – enhanced surveillance of aircraft and vehicles. – 2014. – 6 p. – DOI: 10.1109/TIWDC-ESAV.2014.6945446.
3. Руководство по авиационному наблюдению // Международная организация гражданской авиации. – 2010. – 318 с. – ISBN 978-92-9231-970-0.

## Уважаемые авторы!

Сообщаем Вам, что журнал «Информация и Космос» включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (письмо Минобрнауки № 13-6518 от 01.12.2015).

Приглашаем авторов принять участие в публикации научных статей на страницах журнала «Информация и Космос». Публикация статей осуществляется на безвозмездной основе.

Все статьи проходят обязательное научное рецензирование.

### Требования к предоставляемым материалам

1. Статьи предоставляются в редакцию журнала в двух видах:  
– в печатном виде, подписанные каждым автором;  
– в электронном виде по электронной почте или на электронном носителе.

2. Статья должна быть набрана в текстовом редакторе Microsoft Word, шрифтом Times New Roman. Размер шрифта – 14, межстрочный интервал – полуторный. Левое и правое поля – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см, формат листа – А4.

Иллюстрации должны быть выполнены в ч/б формате\* в виде отдельных графических файлов формата tiff или jpeg. Формулы должны быть выполнены средствами редактора формул Microsoft Equation или MathType.

Библиографический список должен быть составлен по порядку ссылок в статье и оформлен в соответствии с ГОСТ 7.1–2003. Сокращения, применяемые в библиографических описаниях, должны соответствовать ГОСТ 7.12–93.

Рекомендуемый объем статьи:

- 7–10 страниц – оригинальные научные статьи;
- 10–15 страниц – научно-технические и научно-практические статьи;
- 15–20 страниц – обзорно-аналитические статьи.

3. К статье должны быть приложены:

- экспертное заключение о возможности публикации в открытых источниках;
- аннотация на русском и английском языках (300–500 символов);
- перечень ключевых слов на русском и английском языках;
- сведения о каждом авторе:
  - фамилия, имя и отчество на русском и английском языках;
  - ученая степень, ученое звание, почетные звания;
  - место работы (город и полное название компании) и занимаемая должность;
  - контактный телефон и адрес электронной почты.

4. Содержание статьи должно соответствовать тематике одного или нескольких разделов журнала

\* Публикация цветных иллюстраций к статье является платной. Стоимость услуги можно посмотреть на сайте [www.infokosmo.ru](http://www.infokosmo.ru)

**Учредитель:**  
Санкт-Петербургская  
научно-техническая  
общественная организация  
«Институт телекоммуникаций»

**Главный редактор**  
Присяжнюк С. П.  
заслуженный деятель науки РФ,  
действительный член АИИ им. А. М. Прохорова,  
доктор технических наук, профессор.

**Редакционная коллегия**  
Юсупов Р. М.  
член-корреспондент РАН,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Иванов К. М.  
доктор технических наук, профессор  
Филатов В. Н.  
действительный член АИИ им. А. М. Прохорова,  
доктор военных наук, профессор  
**[Лихачев А. М.]**  
заслуженный деятель науки РФ,  
заслуженный изобретатель РФ,  
действительный член Международной академии связи,  
доктор технических наук, профессор  
Гончаревский В. С.  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Замарин А. И.  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Осипов Г. К.  
доктор географических наук, профессор  
Осадчий А. И.  
доктор технических наук, профессор  
Ясинский С. А.  
доктор технических наук, доцент

---

**По вопросам сотрудничества,  
пожалуйста, обращайтесь в отдел  
маркетинга по номеру  
+7 (812) 740-77-07  
или по электронной почте  
[marketing@itain.spb.ru](mailto:marketing@itain.spb.ru)**

---

Заместитель главного редактора  
Аванесов М. Ю.

Издатель  
Аксенова Т. Н.

**Адрес редакции:**  
194100, Санкт-Петербург,  
Кантемировская, 5  
Тел. + 7 (812) 740-77-07  
[www.infokosmo.ru](http://www.infokosmo.ru)

Электронный архив  
всех статей журнала  
доступен на сайте:  
<http://infokosmo.ru/magazine/archive>

Журнал зарегистрирован в государственном  
комитете РФ по печати.  
Регистрационный номер: ПИ № ФС77-26926  
от 19 января 2007 г.

Тираж 1500 экземпляров  
Дата выхода: 15.12.2017

При использовании материалов ссылка  
на журнал «Информация и Космос»  
**обязательна.**

Мнение редакции может не совпадать  
с мнением авторов.

За содержание рекламных материалов  
несут ответственность рекламодатели.

Отпечатано  
в ООО "Типографский комплекс  
"Девиз"  
Санкт-Петербург,  
ул. Трефолева, 2, лит. ББ  
тел. (812) 335-18-30  
[www.npt.ru](http://www.npt.ru)

Свободная цена