

Содержание

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Лихачев А.М., Роднин Ю.А.

Основные задачи развития системы распределенных ситуационных центров в Российской Федерации 6
В статье рассматриваются две основные задачи развития системы распределенных ситуационных центров (СРСЦ) – задача синтеза информационной сети СРСЦ и задача классификации информационных ресурсов в ситуационных центрах. Первая актуальная задача связана с формированием единого информационного пространства органов государственной власти Российской Федерации (ОГВ РФ) путем интеграции как существующих, так и создаваемых информационно-телекоммуникационных систем ОГВ РФ. Вторая вызвана появлением больших массивов данных, которые необходимо структурировать и анализировать для принятия грамотных управленческих решений.

Ковалгин Ю.А., Сантуш В.

Современное состояние и тенденции развития цифрового телевидения и радиовещания в мире 11
Проанализировано современное состояние систем эфирного наземного телевидения и радиовещания в мире. Рассмотрены тенденции перехода на цифровые системы, рекомендуемые ITU-R для применения в данной области.

Попов Д.И.

Анализ адаптивной обработки когерентных сигналов на фоне помех 25
В статье проведен анализ адаптивной квазиоптимальной системы «режекторный фильтр – многоканальный фильтр». Установлена связь между подавлением помехи в системе и ошибками адаптации весовых коэффициентов адаптивных режекторного и многоканального фильтров к неизвестным параметрам помехи. Полученные соотношения позволяют выбирать объем обучающей выборки в зависимости от заданной величины потерь адаптации, спектрально-корреляционных свойств помехи и структуры системы обработки.

Биккенин Р.Р., Андрюков А.А.

К вопросу о применении беспилотных летательных аппаратов корабельного базирования в качестве ретрансляторов в системах обмена информацией 30
Рассмотрены вопросы применения беспилотных летательных аппаратов корабельного базирования в качестве ретрансляторов радиосигналов. Представлены основные требования к этим аппаратам. Показана возможность помехозащищенной ретрансляции в условиях радиоэлектронной борьбы при использовании псевдослучайных сигналов и относительной фазовой модуляции второго порядка.

Тихонов С.С., Дворников С.В., Кудрявцев А.М.

Энергетическая скрытность сигналов ППРЧ, сформированных в базисах функций сплайн-характеров 35
На основе проведенных ранее теоретических исследований по разработке сигналов в базисах сплайн-характеров для передачи их в режиме ППРЧ рассмотрены возможности этих сигналов в части дополнительного повышения скрытности линий радиосвязи с ППРЧ. Эффект достигается за счет распределения энергии новых сигналов на гораздо большем частотно-временном пространстве при оценке их в классических гармонических базисах. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие правомочность теоретических заключений.

Ясинский С.А., Зюзин А.Н., Грязев А.Н.

Алгоритм определения защитных контуров для многоконтурных защитных структур на транспортной сети телекоммуникационной системы 42
Рассматривается алгоритм определения защитных контуров для многоконтурных защитных структур транспортной сети телекоммуникационной системы, который позволяет найти структуру каждого защитного контура и рассчитать пропускные способности ребер, входящих в каждый защитный контур.

Пшеничников А.В.

Модель многопозиционной помехозащищенной сигнальной конструкции на основе QPSK модуляции 48
В статье описана разработанная модель многопозиционной помехозащищенной сигнальной конструкции. На основе методов теорий сигналов, статистической радиотехники сложные модели сигнальных конструкций представлены совокупностью простейших модуляционных форматов на основе QPSK модуляции. Для объединения модулирующих сигнальных форматов применена технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов. Разработанная сигнальная конструкция обладает свойствами ортогональности и имеет повышенное, по сравнению с известными, значение помехоустойчивости.

Карманов А.Г., Чжао Лэй, Бондаренко И.Б., Иванова Е.А.

Модель многопозиционной помехозащищенной сигнальной конструкции на основе QPSK модуляции 53
В работе рассмотрен набор методов, использованных для проектирования систем связи с наземными подвижными объектами при построении геоинформационных систем. Представленная методология опирается на методы экспертных оценок, оптимизации, аппарат искусственных нейронных сетей, математическую статистику. Позволяет производить оценку применимости компонентов беспроводных сетей для разработки защищенных систем связи на основе анализа параметров живучести.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Легков К.Е., Буренин А.Н., Емельянов А.В.

Основные показатели качества функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами 58
Для обеспечения требуемых показателей оперативности и непрерывности управления сложными организационно-техническими объектами в рамках автоматизированной системы управления (АСУ) ими создается развитая информационная подсистема, которая обеспечивает должностным лицам органов управления и комплексам средств автоматизации АСУ получение необходимых информационных услуг. В данной статье уделяется основное внимание вопросам выбора и обоснования показателей качества функционирования информационной подсистемы АСУ сложными организационно-техническими объектами.

Темкин И.О., Куляница А.Л., Дерябин С.А.

Вычислительные модели взаимодействия автономных мобильных агентов транспортного комплекса горных предприятий 65
В данной работе рассматривается один из аспектов разработки интеллектуальной системы управления горнотранспортным комплексом. Показано, что с функциональной точки зрения такая система может быть построена на основе трехуровневой архитектуры, учитывающей особенности работы автономных агентов и включающей «вычислительный слой». Кратко рассмотрена структура большого информационного массива данных (в том числе навигационных), который постоянно пополняется и обновляется в процессе транспортирования горной массы. Подробно обсуждаются различные с функциональной точки зрения вычислительные модели идентификации и прогноза, необходимые для организации взаимодействия автономных агентов. Также предлагаются варианты схем построения этих моделей и способов формализации. Приводятся сведения о некоторых результатах моделирования.

Смагин В.А., Ширямов О.А.

Оптимальное в смысле заполнения квантование информации при наличии случайных ошибок в квантах 72
Решается задача оптимального в смысле заполнения квантование информации при условии возникновения случайных ошибок в квантах и определения величины пробела между квантами для устранения этих ошибок.

Брунилин А.А., Саенко И.Б., Ясинский С.А., Лыжинкин К.В.

Метод формирования семантической модели оперативной обстановки в системах управления организационного типа 76

Рассматривается метод поэтапного формирования семантической модели оперативной обстановки для систем управления организационного типа. Приводится формализация целевого результата метода, процедур синтаксического и семантического анализа концептов, адаптирующих действий. Применяется комбинация иерархического и параметрических методов декомпозиции критериев применительно к семантическим моделям.

Ерунов А.А.

Модель асинхронного мультиплексирования скрывааемых данных в видеоконтейнере переменной емкости 81
Развитие методов сокрытия данных и расширение приложений цифровой стеганографии требует поиска компромисса между скрытностью и пропускной способностью скрытых каналов передачи данных. В данной статье обоснована актуальность исследований в направлении перераспределения пропускной способности группового скрытого канала передачи данных в видеопотоке системы спутниковой связи, предвостановлен подход, позволяющий увеличить число скрытых каналов передачи данных в одном видеопотоке за счет асинхронного мультиплексирования.

Чернов И.В.

Методика применения аппаратуры потребителей космических навигационных систем для автономного определения азимутов требуемой точностью 88

В статье рассматривается методика определения геодезического азимута направлений по результатам обработки спутниковых измерений. Доказывается, что в локальном районе возможно высокоточное определение азимута без использования исходной геодезической основы. Изложены основные положения предлагаемой методики и результаты исследований, которые показывают, что относительный метод космической геодезии способен обеспечить высокоточные азимутальные определения.

Дикий Д.И., Артемьева В.Д., Однороченко П.В., Карманова Н.А.

Формирование вектора признаков пользователя по динамике рукописного почерка 95

Статья посвящена исследованию предлагаемого алгоритма, применяемого в системах аутентификации пользователей различных информационных систем по динамике рукописного почерка. Основной задачей алгоритма является формирование вектора признаков определенной длины путем извлечения из полного ряда декартовых координат траектории, полученных с устройства ввода, только тех, которые несут наибольшую информативную значимость.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Зализнюк А.Н., Александров Ю.С., Присяжнюк С.П., Карманов Д.В., Присяжнюк А.С.

Объектно-ориентированная геопространственная информация, достоинства и недостатки при ее создании и применении 102

В статье рассматривается информационная модель объектно-ориентированной геопространственной информации, ее преимущества при использовании в современных автоматизированных системах управления и особенности при ее создании и применении в геоинформационных системах.

Шахраманьян М.А., Казарян М.Л., Рихтер А.А.

Построение 3D-моделей объектов захоронения отходов и оценка их объемных характеристик 107

В работе предлагается методика построения 3D-моделей объектов захоронения отходов (свалок, полигонов твердых бытовых отходов, терриконов и т.д.) по данным высотных изображений. Представлена блок-схема методики и описаны основные этапы обработки. Приведена общая классификация пространственных геометрических параметров объектов захоронения отходов, к которым относятся объем, площадь поверхности, высота, угол откоса, шероховатость, параметры эквивалентного эллипсоида, радиальные и радиально-временные изменения концентрации замусоривания и т.д. Описаны формулы расчета некоторых наиболее важных из них. Обозначены основные виды трехмерных образов объектов захоронения отходов (уровни высот, контур поверхности, изображение поверхности).

Алексеев В.Ф.

Оценка возможностей спутниковой градиентометрии по картографированию детального гравитационного поля Земли 114

В статье предлагаются уравнения для оценки средних квадратических ошибок определения аномалий силы тяжести на поверхности Земли по результатам обработки вторых производных геопотенциала, измеренных на спутниковых высотах. Показано, что для решения некорректной задачи пересчета результатов измерений со спутниковых высот на поверхность Земли могут применяться методы регуляризации. На основе выполненных исследований сделан вывод о возможности применения спутниковой градиентометрии для точного картографирования детальной структуры гравитационного поля Земли.

Камынина Н.Р., Непоклонов В.Б., Шлапак В.В., Лонский И.И., Лотова К.С.

Интеллектуализация геоинформационных систем 118

Рассмотрены геоинформационные системы (ГИС) как источник геопространственной информации для процесса принятия решений, эффективность менеджмента при использовании ГИС, применение экспертной системы для повышения эффективности ГИС на основе анализа локальных баз данных тематического слоя и на основе анализа изображения тематического слоя, база знаний, векторно-иерархический подход, проекция вектора цели на тезаурус информационной системы.

Молчанов А.С.

Оценка качества аэрофотосистем дистанционного зондирования Земли с использованием частотно-колориметрического показателя 122

В статье рассмотрена возможность применения частотно-колориметрического показателя для оценки цветных фотографических изображений, полученными аэрофотосистемами дистанционного зондирования Земли. В качестве численного значения частотно-колориметрического показателя предлагается использовать пороговую величину цветового различия между объектом и фоном.

Захарян Ю.Г.

Применение перспективных направлений пространственно-временной геостатистики в агропромышленном комплексе 129

Пространственно-временной геостатистический анализ дал возможность использовать методологии геостатистики и ковариационную функцию, которые были расположены на нерегулярной пространственной и временной сетке. Предлагается алгоритм двухточечной пространственной вариации, при предположении о стационарности второго порядка для сельскохозяйственных территорий, а также для решения одного из принципиальных вопросов применения перспективных направлений в пространственно-временном континууме о целесообразности дифференциации технологических воздействий и перехода на четырехмерную систему x, y, z, t с учетом геоинформационных данных и анализа космического мониторинга.

Титов Г.С.

Метод распределенных вычислений для решения класса геоинформационных задач, чувствительных к масштабу и размерности векторов исходных данных 136

Предложен метод организации вычислений при обработке геопространственных данных большой размерности в системах поддержки принятия решений. В отличие от известных методов, требующих либо построения фронта волны, либо применения эвристических правил, предлагаемый метод обеспечивает решение путем декомпозиции задачи на более простые, построения частных решений и объединения частных решений в общее.

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Гончаревский В.С.

Оптимальное управление взаимным маневром космических аппаратов вдоль линии визирования в орбитальной относительной системе координат 148

Статья посвящена отысканию энергетически оптимального управления взаимным маневром космических аппаратов при использовании методов движения вдоль линии визирования. В результате решения вариационной задачи Лагранжа с фиксированными концами получены оптимальные управляющие функции в замкнутой аналитической форме для одного из таких методов – метода орбитального параллельного сближения. Моделирование программ управления позволило сформулировать рекомендации по выбору направления и времени выполнения маневра.

Гусеница Я.Н., Новиков А.Н.

Методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники 154

Проведен анализ существующего научно-методического обеспечения, используемого при проведении метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники. Представлена методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники, позволяющая, в отличие от существующих, учесть субъективность оценок, а также уровень компетентности метрологов-экспертов. Данная методика может быть реализована в виде программного обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта, которое по мере участия каждого привлекаемого эксперта позволит корректировать и выработать обоснованное решение о выявленных несоответствиях при проведении метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники.

Горшков Л.А., Мосин Д.А., Тютюкин А.Е., Уртминцев И.А.

Методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники 160

Рассмотрена унифицированная модель энергетической системы (ЭС) космического аппарата (КА), содержащая в своей структуре минимальный набор функциональных элементов. Разработаны математические модели теплообмена основных элементов энергетического оборудования космических аппаратов с учетом положения центра масс КА и их углового положения. Анализ модели ЭС позволяет выполнить обоснование рациональной структуры ЭС перспективного КА.

Устюгов Е.В.

Выбор оптимальной компоновочной схемы и архитектуры бортовой кабельной сети наноспутника SamSat-QB50 168

В статье предлагается методика выбора оптимальной топологии бортовой кабельной сети на примере наноспутника SamSat-QB50, и решается задача выбора оптимальной компоновки исходя из предлагаемых критериев. Рассмотренные критерии оптимальности топологии бортовой кабельной сети и компоновочной схемы составлены на основе опыта разработки и изготовления наноспутников. Демонстрируется разработанная методика выбора компоновочной схемы с учётом требований бортовой аппаратуры и возможностей стандарта CubeSat. В статье приводятся описание бортовых систем наноспутника SamSat-QB50, описание принципов их работы и массовые характеристики, что позволяет наглядно показать и обосновать причины выбора нужной компоновки. Топология бортовой кабельной сети представлена графом, состоящим из подграфов бортовых систем и рёбер между разъёмами этих систем. Показываются методика сокращения выборки возможных топологий бортовой кабельной сети и критерии выбора работоспособных топологий. Также приводится окончательная компоновочная схема и схема бортовой кабельной сети наноспутника SamSat-QB50 на этапе готовности к лётным испытаниям.

ФИЛОСОФИЯ ИНФОРМАЦИИ

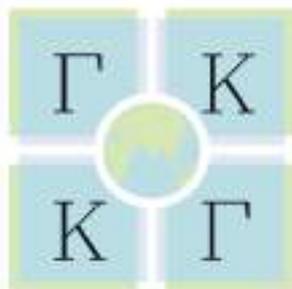
Присяжнюк С.П.

Информация и реальность 180

Кравченко В.В.

Космические основы понимания «Природы» в ее взаимоотношениях с «Культурой» 182

Статья посвящена рассмотрению философского понятия «Природы» на базе теоретико-научного наследия русских космистов (В. И. Вернадского, К. Э. Циолковского, А. Л. Чижевского) и Р. Коллина, современного последователя русских духовных учителей. Приведены признаки «космоса» по Р. Коллину, на основе которых Природа рассматривается не только как особая целостность, но и как подсистема планеты Земля, как особого «космоса», органично встроенного в иерархию высших «космосов» – Солнечной системы, Галактики Млечный путь и Вселенной. Для различения и сопоставления космосов разных уровней в статье предлагается ряд критериев: пространственных ограничений, познаваемости, освоенности (возможности человеческой деятельности) и разумности. Предложены некоторые версии постановки проблемы глобальных соотношений Культуры и Природы. Выдвигается концепция существования особого «Природно-Культурного космоса», имеющего непосредственное отношение ко всей иерархии космосов мироздания.



ГеоКа 2017 GeoCa

Русское географическое общество

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
(Университет ИТМО)

Санкт-Петербургский государственный университет
(Институт Наук о Земле)

Санкт-Петербургское общество геодезии и картографии

II Международная научно-практическая конференция

Геодезия, Картография, Геоинформатика и Кадастры.
От идеи до внедрения.

15–17 ноября 2017 года

Санкт-Петербург

Saint Petersburg

Основная тема конференции:
**«НАУКА, ОБРАЗОВАНИЕ И
ПРОИЗВОДСТВО:
ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ».**

Наша конференция – это площадка для обмена опытом и представления результатов научно-исследовательских работ и инноваций в области геодезии, картографии, геоинформатики и кадастра.



www.geoca-conference.ru



support@geoca-conference.ru



+7 (812) 309-71-67



г. Санкт-Петербург,
пер. Гривцова, д. 10

Радиотехника и связь

(05.12.00*)

- Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (05.12.04*)
- Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (05.12.07*)
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций (05.12.13*)
- Радиолокация и радионавигация (05.12.14*)

раздел



Основные задачи развития системы распределенных ситуационных центров в Российской Федерации

The main tasks of developing of distributed situational centers system in the Russian Federation

Лихачев / Likhachev A.

Александр Михайлович

(lih_2000@mail.ru)

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заслуженный изобретатель РФ,
действительный член Международной
Академии Связи.

АО «Научно-исследовательский институт «Рубин»,
советник генерального директора.

г. Санкт-Петербург

Роднин / Rodnin Y.

Юрий Александрович

(rodnin1979@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВАС им. С.М. Буденного, соискатель.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: ситуационный центр – situational center; системы распределенных ситуационных центров – systems of distributed situational centers; ситуационный анализ – situational analysis; синтез информационной сети – synthesis of the information network; информационные потоки – information flows; классификация информации – classification of information.

В статье рассматриваются две основные задачи развития системы распределенных ситуационных центров (СРСЦ) – задача синтеза информационной сети СРСЦ и задача классификации информационных ресурсов в ситуационных центрах. Первая актуальная задача связана с формированием единого информационного пространства органов государственной власти Российской Федерации (ОГВ РФ) путем интеграции как существующих, так и создаваемых информационно-телекоммуникационных систем ОГВ РФ. Вторая вызвана появлением больших массивов данных, которые необходимо структурировать и анализировать для принятия грамотных управленческих решений.

The article considers two main tasks of the development of a system of distributed situational centers (SDSC) – the task of synthesizing the SDSC information network and the task of information resources classification in situational centers. The first actual task is connected with the formation of united information space of the State authorities of the Russian Federation (SA of the RF) by integrating both existing and created information and telecommunication systems of the State authorities of the Russian Federation. The second task is caused by the availability of large data sets, which need to be structured and analyzed for making competent management decisions.

Сегодня в мире насчитывается большое количество ситуационных центров (СЦ). СЦ создаются в органах государственного управления различного уровня, в вооруженных силах, спецслужбах, при международных организациях. Например, такие центры аналитической поддержки принятия решений организованы в Пентагоне, ФБР, при генеральном секретаре Европейского союза. Мощным ситуационным центром, который эффективно используется для анализа политических, военных, экономических и социальных проблем, располагает правительство Германии. В странах Европы подобных центров несколько десятков, более того, достаточно мощные подобные системы имеются практически у всех крупных фирм и корпораций.

В настоящее время и в Российской Федерации наблюдается стремительный рост интереса к внедрению современных информационных технологий в практику работы органов государственной власти (ОГВ). Особенно интенсивно развиваются технологии ситуационного анализа в СЦ Президента Российской Федерации, а также в СЦ Администрации Президента Российской Федерации. Функционируют СЦ в ряде министерств и ведомств РФ, а также в администрациях глав субъектов РФ. Наряду с этим, существенно увеличилась степень неопределенности принимаемых решений во всех сферах управления, порождаемая потерей актуальности традиционных моделей социально-экономического развития и нехваткой необходимой современной модельной базы. При этом эффективность решения задач зависит от достоверности, актуальности, полноты и оперативности информации, получаемой из различных источников (органов государственной статистики, средств массовой информации, результатов социологических опросов населения и руково-

дителей предприятий, информационных агентств и других организаций).

В ходе проводимых в Российской Федерации интенсивных политических, структурных и экономических преобразований особую важность приобретают проблемы информационной поддержки процессов принятия решений ОГВ всех уровней. При этом одна из актуальных задач связана с формированием единого информационного пространства ОГВ путем интеграции как существующих, так и создаваемых информационно-телекоммуникационных систем ОГВ РФ и ОГВ субъектов РФ. Другая актуальная задача вызвана появлением больших массивов данных, которые необходимо структурировать и анализировать для принятия грамотных управленческих решений. Одновременно с ускорением темпов развития информационных технологий сокращается время, отпущенное на принятие управленческих решений или, тем более, решений, принимаемых в кризисных ситуациях. Остановимся на этих задачах более подробно.

Задача синтеза информационной сети системы распределенных ситуационных центров

Современное развитие информационных технологий, неуклонный рост требований к качеству обслуживания потребителей, объемов передаваемой информации, а также переход от разнородных СЦ к системе распределенных ситуационных центров (СРСЦ) привело к необходимости перехода от статистической задачи проектирования структуры информационных сетей к динамической. Существенным также являются ограничения на материальные и трудовые ресурсы, что не позволяет мгновенно реализовать выделяемые капитальные вложения и построить всю информационную сеть СРСЦ полностью. При динамической задаче проектирования информационная сеть СРСЦ рассматривается как развивающаяся система, и построение сети представляет многоэтапный процесс ее развития из некоторой начальной структуры в конечную, обеспечивающую заданное качество обслуживания потребителей на всех этапах ее построения.

Рассмотрим постановку динамической задачи структурного синтеза развивающихся информационных сетей (ИС).

Заданы потенциальные пользователи x_j , $j = \overline{1, n}$ проектируемой ИС; прогноз динамики роста потребностей в информационном обмене на будущий период j -го пользователя $h_j(t)$, $t \in [t_0, T]$, где t_0 – начальный момент создания ИС; T – момент окончания создания функционально полной ИС; начальная стоимость аренды каналов связи (КС) $c_{ар}(t_0, l)$ и стоимость капитальных затрат на создание такого КС $c_{кап}(t_0, l)$, где l – длина канала; набор производительностей коммутационного оборудования, из которого комплектуются сеть $\{П_1, П_2, \dots, П_n\}$.

Необходимо определить этапы проектирования и внедрения сети, при которых обеспечивается минимум суммарных приведенных затрат на создание и развитие сети с учетом роста потребностей пользователей в информационном обмене, изменения характеристик элементов ИС при ограничениях на выделяемые материальные и трудовые ресурсы. В качестве критерия эффективности можно выбрать максимум экономической эффективности от использования уже функционирующей части сети при тех же ограничениях.

Задачу динамического проектирования структуры информационных сетей можно сформулировать следующим образом: задано распределение общих капитальных затрат по отдельным этапам внедрения w_k , $k = 1, 2, \dots, K$, (k – номер этапа) и требуется составить такой план развития сети с учетом перечисленных выше ограничений, при котором максимизируют выбранный критерий эффективности.

Построение математической модели начнем с более простой задачи (1). Допустим, что известны начальная структура информационной сети D_0 , число этапов создания сети K , а также объемы информационной нагрузки всех пользователей сети на конец периода ее создания. Структуру сети, которая получается в результате k -го этапа, обозначим D_k , $k = \overline{1, K}$. Требуется определить такую последовательность структур D_1, D_2, \dots, D_K , при которой суммарный приведенный эффект от использования ИС будет максимальным при условии полного удовлетворения потребностей пользователей в информационном обмене на момент полного ввода в действие всей сети.

Таким образом, мы приходим к следующей постановке динамической задачи структурного синтеза развивающейся информационной сети: при заданной начальной структуре сети D_0 , прогнозах абонентов в информационном обмене на момент окончания создания сети и заданном числе этапов определить оптимальный план развития сети, т.е. найти такие промежуточные структуры D_1, D_2, \dots, D_k , при которых обеспечивается максимальный эффект от использования действующей части сети при ограничениях на капитальные затраты каждого этапа и возможности их освоения. Математическая модель задачи:

$$\max \sum_{k=1}^K H_a(D_k) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\Delta W(D_k / D_{k-1}) \leq w_{k \text{ выд}} \quad (2)$$

$$R(D_k / D_{k-1}) \leq R_{k \text{ выд}} \quad (3)$$

$$h_{ja}(D_k) \leq h_{j \text{ тр}}(t_k) \quad (4)$$

$$h_{ja}(D_K) \leq h_{j \text{ тр}}(T) \quad (5)$$

$$H_a(D_k) = H_a(D_{k-1}) + \Delta H_a(D_k / D_{k-1}), \quad (6)$$

где $H_a(D_k)$ – суммарный объем информационной нагрузки, выполняемый ИС на k -м этапе; $\Delta H_a(D_k / D_{k-1})$ – суммарный прирост объемов информационной нагрузки, выполняемых сетью при переходе от $(k-1)$ -го к k -му этапу; $\Delta W(D_k / D_{k-1})$ – затраты, необходимые для перехода от структуры D_{k-1} к структуре D_k ; $w_{k\text{выд}}$ – капитальные вложения, выделяемые на k -м этапе развития сети; $R(D_k / D_{k-1})$ – вектор трудовых и материальных ресурсов, необходимых для перехода от структуры D_{k-1} к D_k ; $R_{k\text{выд}}$ – фактически выделенные трудовые и материальные ресурсы на развитие сети на k -м этапе; $h_{j\text{тр}}(t_k)$ – суммарный объем информационной нагрузки j -го пользователя, который требуется автоматизировать за k этапов (прогноз); $h_{ja}(D_k)$ – фактически автоматизированный объем информационной нагрузки j -го пользователя за k этапов развития информационной сети.

При решении динамических задач проектирования развивающихся ИС используется следующий принцип преемственности, справедливость которого следует из практических соображений: структура сети на каждом этапе D_k получается расширением структуры предыдущего этапа D_{k-1} при введении новых информационных потоков (ИП), увеличении производительности сети и увеличении объема информации в ИП. При этом введенные ранее ИП не устраняются, а используются на всех последующих этапах вплоть до последнего K , т.е. искомая последовательность структур обладает свойством вложения: $D_1 \subseteq D_2 \subseteq \dots \subseteq D_K$.

Для определения конечной структуры информационной сети при $t = T$ сначала следует решить вспомогательную задачу: найти такую структуру пользовательской ИС D_K , места размещения ситуационных центров федерального уровня (СЦф) и их производительность $P_i(K)$, $y_i \in Y(K)$, при которых потребности всех пользователей в информационном обмене $h_j(T)$ будут удовлетворяться полностью и суммарные приведенные затраты на создание этой «функционально полной» сети будут минимальными. Для решения этой задачи целесообразно применить алгоритмы синтеза пользовательских ИС.

В данном случае следует использовать алгоритм синтеза пользовательских ИС с произвольным числом уровней концентрации. Так, при использовании различных ситуационных центров регионального уровня (СЦр), работающих с различными ИП, экономически целесообразно перейти к синтезу таких сетей, где число уровней концентрации не фиксировано априори, а определяется в процессе синтеза.

Пусть имеется множество $X = \{x_j\}$ – пользователей (П) сети, каждый из которых генерирует информационный поток h_j . Имеется множество СЦр разных типов. Обозначим через $c_{\text{кон}}^s$, $d_{\text{кон}}^s$, $n_{\text{кон}}^s$ – стоимость, пропускную способность и максимальное число ИП типа s . Требу-

ется определить фактические места размещения СЦр $Z^* = \{z_r\}$, тип СЦр в пункте z_r , линии привязки П к соответствующим СЦр (т.е. подмножества X_z) и структуру ИС, чтобы приведенные затраты на ИС при ограничениях, определяемых СЦр и пропускными способностями каналов связи, были минимальными. Введем следующие переменные:

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если } P_i \text{ подключен к СЦр непосредственно,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\delta_{i_z} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_i \text{ подключен к СЦр в пункте } z, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\delta_z = \begin{cases} 1, & \text{если в пункте } z \text{ установлен СЦр,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\delta_{z1} = \begin{cases} 1, & \text{если СЦр в пункте } z \text{ подключен к СЦф,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\delta_{zz'} = \begin{cases} 1, & \text{если СЦр}_z \text{ подключен к СЦр в пункте } z', \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

Математическая модель этой задачи имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} W(\delta_j, \delta_{j_z}, \delta_z, \delta_{z1}, \delta_{zz'}) &= \sum_{j=1}^n c_{j1}^{\text{неп}}(h_j) \delta_j + \\ &+ \sum_{j=1}^n \sum_{z \in Z} c_{jz}^{\text{неп}}(h_j, l_{jz}) \delta_{jz} + \sum_{z \in Z} c_{\text{кон}}^s(H_z) \delta_z + \\ &+ \sum_z c_{z1}^{\text{неп}}(H_z, l_{z1}) \delta_{z1} + \sum_{z \in Z} \sum_{z' \in Z} c_{zz'}^{\text{неп}}(H_z, l_{zz'}) \delta_{zz'} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (7)$$

При условиях

$$H_z \leq d_{\text{кон}}^s \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \delta_{jz} + \sum_{z' \in Z} \delta_{z'z} \leq n_{\text{кон}}^s \quad (9)$$

$$\sum_z \delta_{jz} + \delta_j = 1 \quad (10)$$

Если

$$\delta_z = 1; \text{ то } \delta_{z1} + \sum_{z'} \delta_{zz'} = 1, \quad (11)$$

где H_z – суммарный информационный поток, проходящий через СЦр в пункте z .

$$H_z = \sum_{j=1}^n h_j \delta_{jz} + \sum_{z' \in Z} H_{z'} \delta_{z'z} \quad (12)$$

$$c_{\text{кон}}(H_z) = c_{\text{кон}}^{(s)}; d_{\text{кон}}^{s-1} < H_z \leq d_{\text{кон}}^{(s)} \quad (13)$$

Условия (8) и (9) учитывают ограничения, накладываемые на параметры СЦр типа s . Условие (10) означает, что любой должен быть подключён к СЦр, а условие (11), что любой СЦр в пункте z или подключается непосредственно к СЦр или к другому СЦр в некотором пункте z' .

Предлагаемый алгоритм включает в себя следующие этапы:

- предварительное разбиение исходного множества X на ряд подмножеств X_z , в каждом из которых возможна установка СЦр наименее производительного типа по ограничениям (8) и (9);
- предварительное размещение СЦр в образованных подмножествах X_1, \dots, X_r , т.е. определение пунктов z_1, z_2, \dots, z_r ;
- проверка экономической целесообразности установки СЦр в пунктах z_1, z_2, \dots, z_r и исключение неэкономичных СЦр;
- перепривязка неподключенных P_i к ближайшим СЦр по критерию минимума затрат на связь;
- замена подмножеств X_1, \dots, X_r суперузлами z_1, z_2, \dots, z_r , соответственно в местах установки СЦр;

– последовательное построение кратчайшей связывающей информационной сети с ограничениями из суперузлов, при этом на каждом шаге слияния оценивают целесообразность перехода к более производительному СЦр и проверка ограничения (8) и (9). Решив задачу определения структуры пользовательской сети и определив конечную структуру информационной сети D_K , переходим к отысканию последовательности промежуточных структур D_1, D_2, \dots, D_{K-1} , т.е. к нахождению оптимальной траектории развития информационной сети.

Данный подход позволит обеспечить эффективный механизм расходования выделенных ресурсов на развитие и модернизацию существующей информационной сети СРСЦ с максимумом экономической эффективности от использования функционирующей части сети на всех этапах.

Задача классификации информационных ресурсов в ситуационных центрах

Подготовка информационно-аналитических материалов, проведение мероприятий, связанных с информационной поддержкой деятельности пользователей СЦ, требуют не просто накопления и обработки больших объемов информации. Информация должна, прежде всего, быть проверена, агрегирована по определенным критериям, правильно отклассифицирована соответствующим рубрикам и представлена пользователям в наиболее наглядном и удобном для восприятия виде.

Существующие подходы классификации информационных ресурсов обладают рядом недостатков, не учитывающих специфику работы СЦ. Решение данной

проблемы может быть соотнесено с разработкой модели и методики классификации информационных ресурсов в СЦ. Решение поставленных задач по развитию СЦ ОГВ позволит повысить эффективность взаимодействия органов государственной власти между собой и обеспечить условия для повышения результативности и более широкого использования современных средств СЦ в экономической, социальной и других сферах жизнедеятельности общества и государства.

Таким образом, учитывая достоинства и недостатки существующих подходов при классификации в интересах функционирования СЦ, можно поставить задачу классификации информационных ресурсов:

Из всего множества документов, поступающих в СЦ для анализа, требуется провести их рубрицирование на множество документов, принадлежащих к непересекающимся между собой рубрикам с учетом совместного «действия» рубрик двух противоположных тенденций (критериев): взаимного «притяжения» (тенденции к объединению) и взаимного «отталкивания» (тенденции к разъединению), обеспечивающих выполнение требований к достоверности и оперативности классификации информации. Таким образом, получаем формальную постановку задачи:

Пусть задано множество документов A , которые можно отнести на k непересекающихся рубрик $r_k(A) = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$, тогда показатель качества рубрицирования $P(r_k(A))$ можно представить как количественное выражение ошибочного отнесения некоторой части классифицируемых документов к другой рубрике q :

$$P(r_k(A))_q = P_1(r_k(A))_q + P_2(r_k(A))_q, \quad (14)$$

где P_1 – потери качества классификации, обусловленные вероятностью отнесения документа к соответствующей рубрике в зависимости от количества сформированных рубрик. Данная величина будет обратно пропорциональна количеству вводимых рубрик.

P_2 – потери качества классификации, обусловленные временными затратами на поиск документа с соответствующими атрибутами. В этом случае, чем больше рубрик относительно специализированных тематик, тем с большей достоверностью будет найден соответствующий документ относительно выделенных временного и материального ресурсов.

Требуется найти такое разбиение всей совокупности документов A на рубрики $r_k(A)$, которое обеспечивает минимум отнесения документов к ложной рубрике при ограничениях на достоверность D , вероятность правильной классификации документа $P_{\text{кл}}(t \leq T_{\text{треб}})$ и ресурсах G , задействованных для решения задачи рубрицирования документов, при условии, что начальная мощность рубрик известна.

$$r^*(A) = \arg \min_{r_k \in R_k, k=1, n} P(r_k(A)) \quad \left| \begin{array}{l} D \geq D_{\text{треб}} \\ P(t \leq T_{\text{треб}}) > P_{\text{треб}} \\ G \leq G_{\text{треб}} \end{array} \right. \quad (15)$$

Решение (15) в этом случае и будет выступать формальной постановкой задачи.

Решение поставленных задач по развитию СЦ ОГВ РФ и в целом СРСЦ позволит повысить рациональность взаимодействия ОГВ РФ между собой и обеспечить условия для повышения эффективности принятия управленческих решений. Однако необходимо однозначно понимать, что разработка и эксплуатация СЦ, определение путей и методов дальнейшего их развития возможны только на основе комплексного совершенствования всех составляющих СРСЦ и в первую очередь связанных с информационным и аналитическим обеспечением.

Литература

1. Ильин, Н. И. Ситуационные центры. Опыт, состояние, тенденции развития / Н.И. Ильин, Н.Н. Демидов, Е.В. Новикова. – М.: МедиаПресс, 2011. – 336 с.
2. Инфокоммуникационные сети: архитектура, технологии, стандартизация / Л.Л. Блахов [и др.] ; ред. А.А. Сахнин. – М.: Радио и связь, 2004. – 208 с.
3. Инфокоммуникации. Толковый словарь основных терминов и сокращений / В.Е. Кузнецов [и др.] ; под общ. ред.: А.М. Лихачёва, В.В. Масановца ; Упр. делами Президента Российской Федерации. – Москва, 2012. – 903 с.
4. Зайченко, Ю. П. Структурная оптимизация сетей ЭВМ / Ю.П. Зайченко, Ю.В. Гонга. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.
5. Фрэнк, Г. Сети, связь и потоки / Г. Фрэнк, И. Фриш; пер. с англ. под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Связь, 1978. – 448 с.
6. Ху, Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях / Т. Ху; пер. с англ. под ред. А.А. Фридмана. – М.: Мир, 1974. – 518 с.

Современное состояние и тенденции развития цифрового телевидения и радиовещания в мире

Current state and development trends of digital television and radio broadcasting in the world

Ковалгин / Kovalgin Y.

Юрий Алексеевич

(kovalgin@sut.ru)

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент Международной академии наук высшей школы.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М. А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ),

профессор кафедры радиосвязи и вещания.

г. Санкт-Петербург

Сантуш Виржилио / Santos Vergilio

Матеуш Жоао Душ

(svirgilio5@gmail.com)

СПбГУТ, аспирант.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: цифровое телевидение – digital television; цифровое радиовещание – digital broadcasting; тенденции развития – development trends; диапазон частот – frequency range.

Проанализировано современное состояние систем эфирного наземного телевидения и радиовещания в мире. Рассмотрены тенденции перехода на цифровые системы, рекомендуемые ITU-R для применения в данной области.

The current state of broadcasting terrestrial television and radio broadcasting systems in the world has been analyzed. The trends of transition to digital systems recommended by ITU-R for application in this field have been considered.

Введение и цель работы

Эфирное телевидение и радиовещание (ТРВ), несмотря на бурное развитие сети Интернет, кабельных систем, мобильной связи, по-прежнему продолжает оставаться основным источником информации для населения. Более того, наблюдается активный переход к системам цифрового ТРВ, рекомендованным ITU-R для применения. Это, в первую очередь, обусловлено дополнительными преимуществами, предоставляемыми цифровыми технологиями ТРВ. К числу этих преимуществ следует отнести [1,13]:

- повышение помехоустойчивости;

- возможность создания одночастотных сетей, что существенно экономит радиочастотный ресурс, повышает эффективность использования радиочастотного спектра;

- повышение качества изображения и звука, возможность перехода к объемному телевидению и многоканальной стереофонии;

- обеспечение защиты передаваемых программ и другой информации от несанкционированного доступа, что дает возможность создавать программы платного телерадиовещания;

- создание интерактивных систем ТРВ, при пользовании которыми зритель (слушатель) получает возможность воздействовать на передаваемую программу, заказывать интересующие его программы в удобное для себя время;

- повышение качества и числа программ, передаваемых в диапазонах длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) волн при существенной экономии электроэнергии радиопередающими устройствами;

- возможность мобильного приема программ ТРВ с высоким качеством как в мегаполисах и в местах компактного проживания населения, так и на удаленных и труднодоступных территориях с малой плотностью населения;

- возможность эфирного оповещения населения, правительственных организаций, спецслужб, государственных и коммерческих предприятий в условиях чрезвычайных ситуаций.

Итак, имеющая место тенденция глобального перехода на цифровое телевизионное и радиовещание обуслов-

лена не только нехваткой частотного ресурса, но и все возрастающими запросами общества в получении актуальной информации, необходимостью внедрения единых общемировых стандартов и систем цифрового ТРВ в условиях глобализации, а также наличием присущих данной технологии вещания преимуществ.

Данная работа посвящена рассмотрению тенденций развития цифрового телевидения и радиовещания в мире на этапе перехода к цифровым технологиям в данной области.

Основная часть. Развитие аналогового телевизионного вещания в конечном итоге привело к распространению в мире трех основных стандартов цветного

телевидения: NTSC, SECAM и PAL [1]. Телевидение в данных форматах во многих странах смотрят до сих пор, спустя почти полвека с начала его появления (табл. 1). Системы NTSC, PAL и SECAM различаются в основном принципами формирования сигналов цветности, передаваемых на поднесущих частотах путем уплотнения спектра полного телевизионного сигнала монохромного телевидения, так и спектральными характеристиками сигналов яркости.

Система NTSC [1] используется в Северной и Центральной Америке, в ряде стран восточной части Южной Америки, а также в Японии, Южной Корее и в ряде стран Юго-Восточной Азии. Система SECAM [1,

Таблица 1

Распространение в мире систем аналогового телевидения, рекомендованных ITU-R для практического применения

Название системы	Распространение в мире (страны применения)				
B, G/PAL	Австралия Австрия Албания Алжир Бангладеш Бахрейн Бельгия Бруней Гана Германия Гибралтар Дания Босния и Герцеговина	Замбия Зимбабве Израиль Индия Индонезия Иордания Италия Исландия Йемен Камерун Катар Кения Кувейт	Либерия Люксембург Македония Малави Малайзия Мальдивы Мальта Мозамбик Монако Нигерия Нидерланды Новая Зеландия Норвегия	ОАЭ Оман Пакистан Папа Новая Гвинея Португалия Сербия Сингапур Сирия Словения Судан Сьерра-Леоне Таиланд	Танзания Тунис Турция Уганда Финляндия Хорватия Черногория Швейцария Швеция Шри-Ланка Экваториальная Гвинея Эфиопия
I/PAL	Ангола Ботсвана	Великобритания	Гонконг Ирландия	Лесото	Южная Африка
N/PAL	Аргентина	Парагвай	Уругвай		
D/PAL	Китай				
M/PAL	Бразилия				
D, K/PAL	КНДР	Румыния			
B,G/SECAM	Греция Египет Ирак	Иран Кипр Ливан	Ливия Маврикий Мавритания	Мали Марокко	Саудовская Аравия Тунис
D,K/SECAM	Афганистан Болгария	Венгрия Гвинея Джибути	Заир Конго	Мадагаскар Нигерия Сенегал	Того ЦАР Чад
L/SECAM	Люксембург	Монако	Франция		
M/NTSC	Антильские Острова Бермуды Бирма Боливия Доминиканская республика	Венесуэла Виргинские острова Гаити Гватемала Гондурас Канада	Колумбия Коста-Рика Куба Мексика Никарагуа Панама Перу	США Суринам Филиппины Чили Эквадор Ю. Корея Ямайка	Япония

Таблица 2

Состояние перехода на цифровое наземное эфирное телевизионное вещание

Наименование страны	Выбор стандарта ЦТВ	Статус перехода к ЦТВ	Наименование страны	Выбор стандарта ЦТВ	Статус перехода к ЦТВ
Албания	DVB-T2	Не завершен	Гана	DVB-T	Не завершен
Алжир	DVB-T2	Не завершен	Гвинея	DVB-T	Не завершен
Ангола	DVB-T2	Не завершен	Гвинея-Бисау	DVB-T2	Не завершен
Армения	DVB-T	Не завершен	Индия	DVB-T	Не завершен
Азербайджан	DVB-T2	Не завершен	Индонезия	DVB-T	Не завершен
Бахрейн	DVB-T2	Не завершен	Иран	DVB-T2	Не завершен
Беларусь	DVB-T2	Не завершен	Исламская Республика	DVB-T2	Не завершен
Бенин	DVB-T2	Не завершен	Кения	DVB-T2	Не завершен
Боливия	ISDB-T	Не завершен	Лесото	DVB-T2	Не завершен
Босния	DVB-T2	Не завершен	Мадагаскар	DVB-T2	Не завершен
Герцеговина	DVB-T2	Не завершен	Мали	DVB-T2	Не завершен
Ботсвана	DVB-T2	Не завершен	Маврикий	DVB-T	Не завершен
Бразилия	ISDB-T	Не завершен	Молдова	DVB-T2	Не завершен
Буркина-Фасо	DVB-T2	Не завершен	Мьянма	DVB-T2	Не завершен
Бурунди	DVB-T2	Не завершен	Намбия	DVB-T2	Не завершен
Камбоджа	DVB-T2	Не завершен	Нидерландские Антильские острова	DVB-T2	Не завершен
Камерун	DVB-T2	Не завершен	Нигер	DVB-T2	Не завершен
Кабо-Верде	DVB-T	Не завершен	Нигерия	DVB-T2	Не завершен
Чад	DVB-T2	Не завершен	Оман	DVB-T2	Не завершен
Конго	DVB-T2	Не завершен	Папуа-Новая Гвинея	DVB-T2	Не завершен
Кот-д'Ивуар	DVB-T2	Не завершен	Катар	DVB-T2	Не завершен
Куба	ISDB-T	Не завершен	Румыния	DVB-T2	Не завершен
Республика Конго	DVB-T2	Не завершен	Россия	DVB-T2	Не завершен
Египет	DVB-T2	Не завершен	Самоа	DVB-T2	Не завершен
Экваториальная Гвинея	DVB-T	Не завершен	Сенегал	DVB-T2	Не завершен
Сейшельские Острова	DVB-T	Не завершен	Тунис	DVB-T2	Не завершен
Сьерра-Леоне	DVB-T	Не завершен	Уганда	DVB-T2	Не завершен
Южный Судан	DVB-T	Не завершен	Украина	DVB-T2	Не завершен
Судан	DVB-T	Не завершен	Узбекистан	DVB-T2	Не завершен
Суринам	DVB-T2	Не завершен	Венесуэла	DVB-T	Не завершен
Танланд	DVB-T	Не завершен	Вьетнам	DVB-T2	Не завершен
Того	DVB-T2	Не завершен	Замбия	DVB-T2	Не завершен
Уганда	DVB-T2	Не завершен	Зимбабве	DVB-T	Не завершен
-	-	-	Зимбабве	DVB-T2	Не завершен

2] применяется в России, в странах Восточной Европы и СНГ, во Франции, в большинстве стран Северной Африки и Юго-Западной Азии.

Система PAL [1] применяется в большинстве стран Западной и Северной Европы, в Индии, Китае, Австралии, Бразилии, Аргентине и ряде других стран.

Среди систем эфирного ЦТВ, рекомендованных ИТУ-R для применения, следует особо отметить две из семейства DVB: DVB-T и DVB-T2. Система DVB-T2 (табл. 2 и 3), пожалуй, является одной из самых распространенных систем ЦТВ, рекомендованных ИТУ-R для применения в диапазонах ОВЧ (30...300 МГц) и УВЧ (300...3000 МГц). Стандарт Европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute) на систему DVB-T появился в 1996 году [1, 3, 4].

В феврале 2006 года (в рамках консорциума DVB) был создан исследовательский комитет Study Mission. Он должен был оценить потенциал различных технологий ЦТВ и приступить к разработке улучшенного стандарта, получившего название DVB-T2, реализующего дополнительно также и ряд коммерческих требований:

- возможность приема программ на существующие простые домовые антенны;
- переход на новый стандарт не должен требовать изменения инфраструктуры передающей сети;
- увеличение, как минимум на 30–50% пропускной способности по сравнению с системой DVB-T при идентичных условиях передачи;
- возможность работы передающих станций в одночастотной сети (SFN);
- реализация возможности сосуществования в одном РЧ-канале сервисов, передаваемых с разной степенью помехозащищенности;
- повышение гибкости использования полосы частот радиоканала, возможность его диверсификации;
- наличие механизма снижения пиковой мощности передаваемого сигнала к среднему значению и ряд других менее важных требований.

Перечисленные выше рекомендации были выполнены при разработке стандарта DVB-T2 к середине 2010 г. [3]. Решение о внедрении стандарта DVB-T2 уже приняли администрации Австрии, Великобритании, Германии, Дании, Индии, Испании, Италии, Казахстана, Словакии, Украины, Финляндии, Чешской республики, Швеции, Южной Африки, России, [1, 25,] и многих других стран (табл. 2).

Причем в ряде стран уже переход к ЦТВ завершён, табл.3.

В табл. 4 приведен список стран еще не определившихся с выбором системы ЦТВ. В ряде стран он ещё даже не начался (Бангладеш, Белиз, Центральная Африканская республика, Коморские острова, Эритрея, Ямайка).

Еще раз подчеркнём (табл. 2 и 3), что наибольшее распространение среди стран уже определившихся с выбором системы ЦТВ получает система DVB-T2, как имеющая в настоящее время наилучшие характеристики (табл. 5).

Переход от систем аналогового на цифровое телевидение, установленный Региональной конференцией радиосвязи, проведенной ИТУ-R в Женеве в 2006 году (РКР-06), должен был быть завершён к июню 2015 года [4]. Но в силу целого ряда причин (организационных, экономических и технических) позже этот срок был перенесен на 2020 год [4].

Наблюдаемое снижение стоимости оборудования сетей ЦТВ стандарта DVB-T2 года позволяет к 2020 году создать высокоэффективные системы доставки цифрового контента до пользователей. При этом ограниченный по объему спектр высвобождается за счет перехода от аналогового к цифровому телевидению для других видов использования, в первую очередь для систем подвижной связи.

Обобщенная структурная схема системы DVB-T2 представлена на рис. 1. На входе (ах) системы могут поступать один или множество транспортных потоков MPEG-2 (Transport Stream - TS) и один или множество обобщенных потоков (Generic Stream - GS).

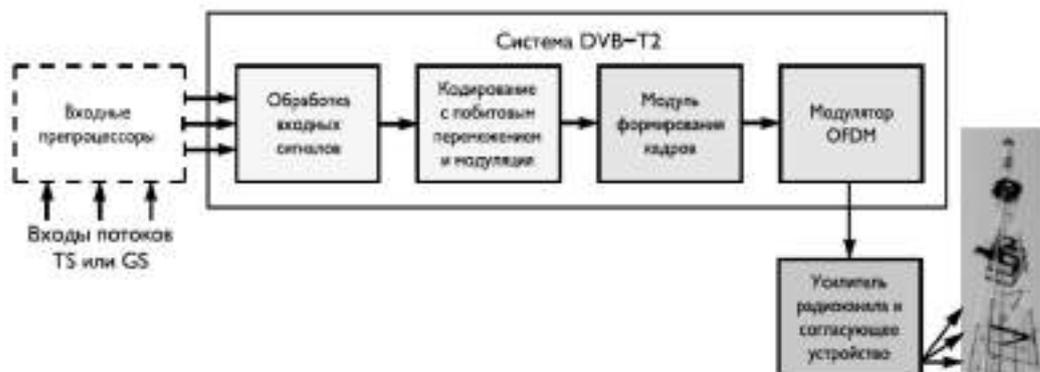


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы DVB-T2

Таблица 3

Список стран, завершивших переход на цифровое наземное телевизионное вещание

Страна	Стандарт	Состояние перехода к ЦТВ	Страна	Стандарт	Состояние перехода к ЦТВ
Андорра	DVB-T2	Завершён	Латвия	DVB-T	Завершён
Австралия	DVB-T	Завершён	Литва	DVB-T	Завершён
Австрия	DVB-T2	Завершён	Люксембург	DVB-T2	Завершён
Бельгия	DVB-T	Завершён	Малави	DVB-T	Завершён
Болгария	DVB-T	Завершён	Мальта	DVB-T2	Завершён
Канада	ATSC	Завершён	Мексика	ATSC	Завершён
Колумбия	DVB-T2	Завершён	Монако	DVB-T	Завершён
Хорватия	DVB-T2	Завершён	Нидерланды	DVB-T	Завершён
Кипр	DVB-T	Завершён	Новая-Зеландия	DVB-T	Завершён
Чешская Республика	DVB-T2	Завершён	Норвегия	DVB-T	Завершён
Дания	DVB-T	Завершён	Польша	DVB-T	Завершён
Эстония	DVB-T	Завершён	Португалия	DVB-T2	Завершён
Финляндия	ISDB-T	Завершён	Руанда (Республика)	DVB-T2	Завершён
Бывшая югославская Республика Македония	DVB-T2	Завершён	Сан – Марино	DVB-T2	Завершён
Франция	DVB-T2	Завершён	Саудовская Аравия	DVB-T2	Завершён
Грузии	DVB-T	Завершён	Сербия	DVB-T2	Завершён
Германии	DVB-T2	Завершён	Словакия	DVB-T2	Завершён
Греции	DVB-T2	Завершён	Испания	DVB-T2	Завершён
Венгрии	DVB-T2	Завершён	Швеция	DVB-T2	Завершён
Исландии	ATSC	Завершён	Швейцария	DVB-T2	Завершён
Исландии	DVB-T2	Завершён	Танзания	DVB-T2	Завершён
Израиля	DVB-T2	Завершён	Объединенные Арабские Эмираты	DVB-T2	Завершён
Италия	DVB-T2	Завершён	Соединенное Королевство,	DVB-T2	Завершён
Япония	ISDB-T	Завершён	США	ATSC	Завершён
Корея респ.	ATSC	Завершён	Ватикан	DVB-T	Завершён
			Замбия	DVB-T2	Завершён

Таблица 4

Перечень стран, еще не определившихся с выбором системы цифрового телевидения

Страна	Выбор стандарта ЦТВ	Статус перехода к ЦТВ	Страна	Выбор стандарта ЦТВ	Статус перехода к ЦТВ
Афганистан	Не определен	Не известен	Лаос	Не определен	Не известен
Антигуа	Не определен	Не известен	Лихтенштейн	Не определен	Не известен
Барбуда	Не определен	Не известен	Мальдивы	Не определен	Не известен
Аргентина	Не определен	Не известен	Маршалловы Острова	Не определен	Не известен
Багамские Острова	Не определен	Не известен	Мавритания	Не определен	Не известен
Бутан	Не определен	Не известен	Микронезия	Не определен	Не известен
Бруней	Не определен	Не известен	Науру	Не определен	Не известен
Чили	Не определен	Неизвестен	Непал (Республика)	Не определен	Не известен
Китай	Не определен	Не известен	Никарагуа	Не определен	Не известен
Коста-Рика	Не определен	Не известен	Ниуэ	Не определен	Не известен
Народный конгрессмен	Не определен	Не известен	Пакистан	Не определен	Не известен
Джибути	Не определен	Не известен	Палау	Не определен	Не известен
Доминика	Не определен	Не известен	Панама	Не определен	Не известен
Доминиканская Республика	Не определен	Не известен	Парагвай	Не определен	Не известен
Эквадор	Не определен	Не известен	Перу	Не определен	Не известен
Сальвадор	Не определен	Не известен	Сент-Китс	Не определен	Не известен
Гренада	Не определен	Не известен	Невис	Не определен	Не известен
Гватемала	Не определен	Не известен	Сент-Люсия	Не определен	Не известен
Гайана	Не определен	Не известен	Сент-Винсент	Не определен	Не известен
Гаити	Не определен	Не известен	Гренадины	Не определен	Не известен
Гондурас	Не определен	Неизвестен	Сингапур	Не определен	Не известен
Ирак	Не определен	Не известен	Соломоновы острова	Не определен	Не известен
Иордания	Не определен	Не известен	Сомали	Не определен	Не известен
Казахстан	Не определен	Не известен	Шри-Ланка	Не определен	Не известен
Кирибати	Не определен	Не известен	Сирия	Не определен	Не известен
Кувейт	Не определен	Не известен	Таджикистан	Не определен	Не известен
Тимор-Лешти	Не определен	Не известен	Тонга	Не определен	Не известен
Тринидад	Не определен	Не известен	Тобаго	Не определен	Не известен
Туркменистан	Не определен	Не известен	Тувалу	Не определен	Не известен
Уругвай	Не определен	Не известен	Вануату	Не определен	Не известен
Йемен	Не определен	Не известен	-	-	-

Входной препроцессор, не являющийся частью системы DVB-T2, формирует транспортные входные потоки, обеспечивает согласование входных сигналов с блоком их обработки в системе DVB-T2, содержащим один, если используется единичный входной поток SIS (режим типа «А»), или несколько модулей адаптации при наличии множества входных потоков MIS (режим типа «В»).

Подсистема входного интерфейса (рис. 2) преобразовывает входной поток во внутренний логический битовый формат. Входной интерфейс должен обеспечить чтение битов поля данных размера DFL (Data Field Length): $0 < DFL < (Kbch - 80)$, где $Kbch$ – число битов, поступающих на вход кодера БЧХ. Заголовок длиной 80 битов вставляется перед полем данных.

В случае если используется несколько входных потоков данных, в составе каждого из них имеются блоки синхронизации и компенсации задержки, возникающей при обработке цифровых данных. Для синхронизации вводится 2 или 3 байта в специальное поле ISSY (Input Stream Synchronisation), в котором передается значение счетчика тактовой частоты модулятора ($1/T$), где T – элементарный тактовый период. Требования, установленные стандартом, предусматривают постоянство скоростей цифровых потоков на выходе мультиплекторов передатчиков и на входе демультимплекторов приемников, а также постоянство сквозной задержки. В некоторых входных сигналах транспортных потоков может присутствовать большая доля нулевых пакетов. На передающей стороне нулевые пакеты удаляются, но таким образом, чтобы они могли быть вставлены в приемнике в точности на то же самое место, где они находились первоначально. С этой целью после каждого переданного пользовательского пакета UP (User Packet) вводится поле длиной в 1 байт – DNP (Deleted Null-Packets), характеризующее удаленные нулевые пакеты [1]. В системах ЦТВ данные цифровых потоков надежно защищены от появления цифровых ошибок помехоустойчивым кодированием, временным

перемежением цифровых данных и перемежением ячеек модуляции (табл. 5). Можно сказать, что в мире идет процесс активного перехода на ЦТВ, который пока ещё в полной мере не завершен.

Что же касается систем цифрового радиовещания (ЦРВ), то здесь ситуация оказывается много сложнее: во многих странах наблюдается явное отставание по срокам перехода на «цифру» в диапазоне ОВЧ (30...300 МГц), предназначенном (согласно рекомендациям ITU-R) в основном для применения систем высококачественного стереофонического радиовещания.

В рекомендациях BS.1114-6 [22] и BS 1660-6 (08/2012) [23] ITU-R представлены особенности построения, технические характеристики и планирование сетей следующих систем цифрового наземного радиовещания:

T-DAB [10], для неё выделена полоса частот 174...240 МГц, ОВЧ III;

ISDB-TSB [26], в телевизионных каналах шириной 6, 7 или 8 МГц для передачи программ звукового вещания выделяется сегмент, как одна четырнадцатая часть полосы частот телевизионного канала, полоса частот этого сегмента составляет 429 кГц (6/14), 500 кГц (7/14), 571кГц (8/14);

DRM+ (Digital Radio Mondiale,[8]), рекомендована ITU-R для применения в диапазонах НЧ (30...300 кГц), СЧ (300...3000 кГц), ВЧ (3...30 МГц) и ОВЧ (30...300 МГц), где для целей радиовещания ITU-R выделены определенные полосы частот;

IBOC HD Radio FM [9], рекомендована ITU-R для применения в диапазоне ОВЧ;

IBOC HD Radio AM [9], рекомендована ITU-R для применения в диапазонах НЧ, СЧ, ВЧ;

РАВИС [1, 24], российская аудиовизуальная информационная система реального времени, рекомендована ITU-R для применения в диапазоне ОВЧ.

Заметим, что технологии IBOC HD Radio FM и IBOC HD Radio AM объединены в рамках одного стандарта. Это же замечание относится и к системам DRM и DRM+. Из перечисленных выше систем ЦРВ лишь две явля-

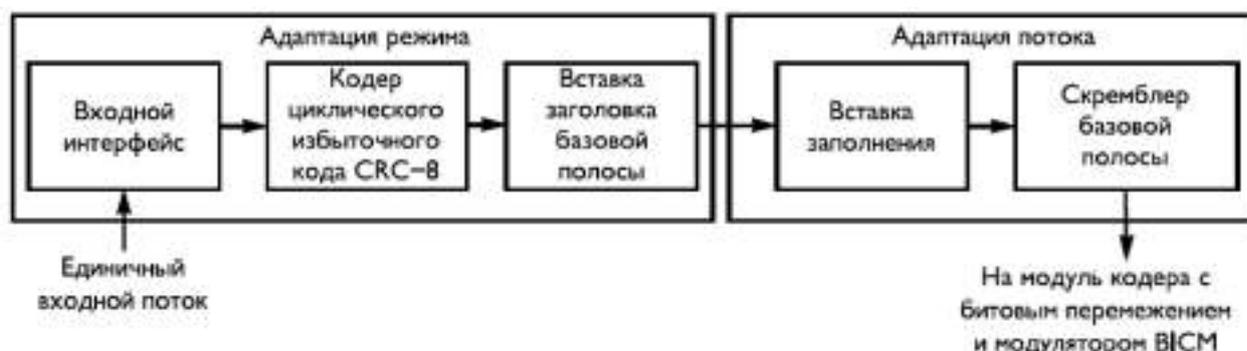


Рис. 2. Структура входного интерфейса стандарта DVB-T2

Таблица 5

Основные характеристики систем эфирного цифрового телевидения

Наименование характеристики	Система DVB-T2, ETSI EN 302 755 V1.3.1 (2012-04)	Система DVB-T, ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2009-01)
Количество несущих частот	2000, 4000, 8000, 32000	2000, 4000, 8000
1. Тип модуляции	OFDM	COFDM
2. Размерность ДПФ	1к, 2к, 4к, 8к, 16к, 32к	2к, 8к
3. Распределенные пилот-сигналы	1%, 2%, 4%, 8% от общего количества несущих частот	8% от общего количества несущих частот
5. Транспортный поток	MPEG-2 TS	MPEG-2 TS
6. Полоса пропускания, МГц	1,7; 5; 6; 7; 8; 10	6; 7; 8;
7. Постоянные пилот-сигналы	0,35% от общего количества несущих частот	2,6% от общего количества несущих частот
8. Ввод данных	MPEG-2 TS; Инкапсуляция Generic Flow (GSE)	MPEG-2 TS через ASI или IP
9. Интерфейс модулятора	T2-MI через ASI или IP	TS через ASI или IP
10. Коррекция ошибок (FEC)	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 5/6 Код LDPC (Low Density Parity CHECH) + BCH (Bose - Chaudhuri-Hocquenghem)	Сверточный код Рида-Соломона, скорость кода: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
11. Защитный интервал	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
12. Длительность полезной части OFDM-символа, мкс	1024Т, 2048Т, 4096Т, 8192Т, 16384Т, 32768Т	1024Т, 512Т, 256Т, 128Т
13. Амплитуда постоянных пилот-сигналов	4/3 4/3 (4√2)√3	8/3 8/3 8/3
14. Модуляция несущих частот OFDM-с	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
15. Поворот сигнального созвездия, град./тип модуляции	29/QPSK; 16,8/16-QAM; 8,6/64-QAM; arctg(1/16)/256-QAM	Нет
16. Количество переданных битов на символ созвездия (для PLP 1)	2, 4, 6, 8	2, 4, 6
17. Тип полезной нагрузки	GFPS, GCS, GSE, TS	MPEG-2 TS
18. Относительная скорость кодирования	2/3, 3/4, 4/5	3/4, 5/6, 7/8
19. Отношение «сигнал/шум», дБ	18,4, 20,6, 22	18,6, 20, 21,1
20. Скорость передачи, Мбит/с	40, 23, 45, 24, 48, 27	27, 14, 30, 16, 31, 67

ются наиболее универсальными, они рекомендованы ITU-R для применения во всех полосах частот, выделенных для радиовещания (диапазоны НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ). Это системы DRM и IBOS HD Radio.

Основные характеристики систем ЦРВ, рекомендованных ITU-R для применения в диапазоне ОВЧ, приведены в табл. 6, а их распространение в мире – в табл. 7.

Из данных табл. 7 следует, что наибольшее распространение в настоящее время получила система DAB [6]. Она является одной из первых систем ЦРВ; стандарт европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute) на эту систему появился в 1997 году.

Изначально система DAB позиционировалась разработчиками только как система цифрового радиовещания (ЦРВ), предназначенная для передачи звуковых программ разного качества, сопутствующей им информации или просто цифровых данных.

Система DAB удобна для применения в крупных мегаполисах, а также в районах с большой плотностью населения, где выгодно построение одночастотной сети. Однако это не исключает ее применения и на региональном уровне, и просто в качестве отдельно работающих радиостанций, что также предусмотрено стандартом. Позже были разработаны, а затем стандартизованы более эффективные алгоритмы компрессии цифровых аудиоданных [5, 16–19]. Они были добавлены в новую вторую версию стандарта, получившую название DAB+ [5], появившуюся в 2006 году. В частности, были добавлены алгоритмы компрессии, реализованные в кодере HE-AAC v.2 стандарта MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 [18] и в стандарте MPEG D Surround [19]. Возможность использования алгоритма компрессии MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer II осталась и в этой версии стандарта на систему DAB+. Однако из-за более высокой степени сжатия данные аудиосуперфрейма в системе DAB+ требуют дополнительной

защиты от цифровых ошибок. Она реализуется в системе DAB+ с помощью кода Рида-Соломона. Цифровые данные аудиосуперфрейма кроме помехоустойчивого кодирования подвергаются также и временному перемежению битов (рис. 3).

Система DAB+ – это гораздо более гибкая технология, при её применении возможен мобильный прием на простую штыревую антенну самой разнообразной мультимедийной информации, включая и мобильное телевидение. Заметим, что последующая обработка цифровых данных субканалов в системе DAB+ не претерпела изменений по сравнению с системой DAB.

В 2009 году появилось дополнение [20] к системе DAB+, посвященное передаче видеoinформации (видеосервисов), что превращает ее уже в полноценную мультимедийную систему, ориентированную на мобильный прием программ радиовещания и телевидения (рис. 3) [6, 14].

По данным [14] регулярное вещание по системам семейства DAB/DMB ведется в 21 стране, экспериментальное вещание еще в 18 странах. С 2005 года по системе T-DMB началось вещание в Сеуле (Южная Корея). К началу 2006 года в мире насчитывалось уже 18 проектов по внедрению технологии DMB на основе существующей наземной вещательной инфраструктуры T-DAB. В Европе [15] основные проекты были развернуты в Германии, Франции, Норвегии, Голландии, Финляндии, Англии и Италии. Лидером в этом процессе является ФРГ, где в июне 2006 г. работало уже 39 передатчиков T-DMB в 12 городах на основе применения транспортных механизмов системы DAB.

В 2016 году появилась последняя версия стандарта на систему DAB [10].

Спецификация [19] превращает систему DAB/DAB+ по своим характеристикам в мультимедийную систему А (иначе T-DMB) [12, 20, 21]. В радиоканале шириной 1,54 МГц с использованием транс-

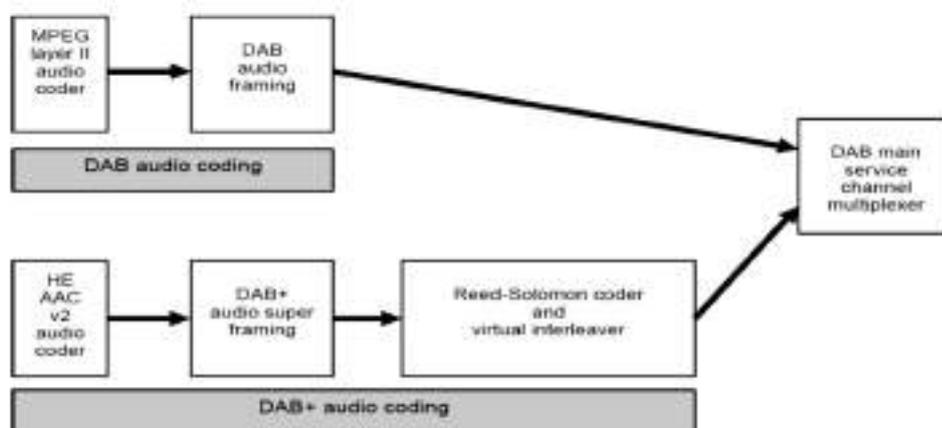


Рис. 3. К применению кодера HE-AAC v.2 в системе DAB+

Таблица 6

Основные характеристики систем цифрового радиовещания, рекомендованные ITU-R для применения в диапазоне ОВЧ

Наименование характеристики	Значение характеристики							
	T-DAB	DRM+	T-DMB	ISDB-Tsb	IVOC HD RADIO FM	РАВИС		
1. Полоса частот диапазона ОВЧ, МГц	174-240	47-68; 65,8-74; 76-90; 87,5-107,9; 174-240	174-240	188-192	87,5-108; 174-240	65,8-74; 87,5-108		
2. Применение	Для цифрового наземного звукового радиовещания на автомобильные, переносные и стационарные приемники; для работы в условиях многослучевости; позволяет обеспечить массовое производство недорогих бытовых приемников. Может использоваться одночастотные сети SFN, локальные сети, отдельные передатчики.							
3. Вид модуляции	COFDM	OFDM	COFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM
4. Модуляция поднесущих частот	DQPSK	4-QAM, 16-QAM	DQPSK	DQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK	QPSK, 16-QAM, 64-QAM		
5. Полоса частот радиоканала, кГц	1712	100	1540	429, 500, 571-1278 1500, 1713	≈400	100, 200, 250		
6. Количество поднесущих частот	1536ТМ1, 768ТМII, 384ТМIII, 192ТМIV	213	1536ТМ1; 384ТМII; 192ТМIII; 768ТМIV	216-1728	380-418 456-1092	215, 439, 553		
7. Разнос поднесущих частот, Гц	1000, 2000, 4000, 8000	444 4/9	1535, 384 192, 768	992, 1984, 3968	363,373	444 4/9		
8. Величина защитного интервала	24,6%	1/9	246ТМ1; 62ТМII; 31ТМIII; 123ТМIV	1/4, 1/8, 1/16 1/32	1/20	1/8		
9. Скорость цифрового потока, кбит/с	576-1152	37-186	1246ТМ1; 312ТМII; 156ТМIII; 623ТМIV	280-5300	48-96	80-900		

10. Стандарт кодирования аудиосигналов	MPEG-1/2 Layer II; MPEG-4 HE-AAC v.2 MPEG D Surround	MPEG-4 HE-AAC v.2 MPEG-4 xHE-AAC MPEG D Surround	MPEG-1 MPEG-2 AAC v.2; MPEG Surround	MPEG-2 AAC Layer 2, MPEG-2 AAC, AC-3	iBiquity HD Codec HE-AAC, Surround	H.264/AVC; MPEG-4 HE-AAC v.2, MPEG Surround
11. Спектральная эффективность бит/с/Гц	0,34–0,67	0,37–1,86	-	0,65–3,09	0,34–0,69	0,8–3,6
12. Отношение сигнал/шум при радиоприеме, не менее, дБ	4,5–8,3 7–18	-	-	-	-	-
13. Скремблирование цифровых данных	Имеется					
14. Защита от одиночных цифровых ошибок	Сверточный код, временное перемежение логических фреймов с глубиной 16 фреймов (384 мес)	Сверточное кодирование; перемежение битов; перемежение QAM ячеек	Сверточный код; скорость кода от 1/3 до 3/4	Сверточный код; скорость кода: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8, (материнский код = 1/2). Код РС (204, 188), (Рида-Соломона).	Сверточные коды Виттерби, скорость кода 2/5	БЧХ, двоичный блочный код Bose-Чоудури-Хоквингема, (Bose-Chaudhuri-Narasimham multiple error correction binary block code); код LDPC, коды с малой плотностью проверок на четность (low density parity check).
15. Защита от групповых ошибок	Временное перемежение цифровых данных в канале КОС					
16. Защита от селективного затухания в радиоканале	Частотное перемежение ячеек модуляции					
17. Возможность совместной передачи сигналов аналогового и цифрового радиовещания	Имеется					
18. Условный доступ	Имеется					
19. Доступ к технической информации	Свободный					

Распространение систем цифрового радиовещания, рекомендованных ITU-R для применения в диапазоне ОВЧ

Состояние (статус)	Название системы цифрового радиовещания			
	DAB/DAB+	DRM/DRM+	IBOC HD RADIO FM	ISDB-T _{SB}
Регулярное радиовещание	Австралия	Австралия	США	Аргентина
	Бельгия	Дания	Аргентина	Бразилия
	Чешская Республика	Чешская Республика	Мексика	Боливия
	Дания	Тунис	Канада	Ботсвана
	Франция	Малайзия	Чешская Республика	Венесуэла
	Германия	Венгрия	Колумбия	Коста-Рика
	Гибралтар	Индия	Ямайка	Перу
	Гонконг	Канада	-	Парагвай
	Ирландия	США	-	Япония
	Италия	Эквадор	-	-
	Кувейт	Швейцария	-	-
	Мальта	Нидерланды	-	-
	Монако	Монголия	-	-
	Нидерланды	Фиджия	-	-
	Норвегия	Япония	-	-
	Польша	Н. Зеландия	-	-
	Словения	Норвегия	-	-
	Южная Корея	Корея	-	-
	Испания	Испания	-	-
	Швеция	Россия	-	-
Швейцария	Мексика	-	-	
Великобритания	-	-	-	
Экспериментальное радиовещание	Австрия	Бразилия	Китай	Уругвай
	Бахрейн	Франция	Польша	Чили
	Бруней-Даруссалам	Южная Африка	Чешская Республика	Никарагуа
	Китай	Ватикан	Сальвадор	Гондурас
	Китайский Тайбэй	Хорватия	Франция	Сальвадор
	Святейший Престол (Ватикан)	Германия	Германия	Гватемала
	Венгрия	Пакистан	Индонезия	Филиппины
	Индонезия	Ватикан	Филиппины	Шри Ланка
	Израиль	Румыния	Пуэрто-Рико	Молдова
	Латвия	Нигерия	Панама	Эквадор
	Малайзия	Белорус	Н. Зеландия	
	Монголия	-	Тринидад	
	Мьянма	-	-	
	Новая Зеландия	-	-	
	Румыния	-	-	
	Словакия	-	-	
	Южная Африка	-	-	
	Таиланд	-	-	

Неопределившиеся страны	Тунис	-	-	
	Турция	-	-	
	Украина	-	-	
	Объединенные Арабские Эмираты	-	Доминиканская республика	
	Эстония	Мозамбик	-	
	Литва	Танзания	-	
	Российская Федерация	Замбия	-	
	Сербия	-	-	
	Сингапур	-	-	
	Шри Ланка	-	-	
Вьетнам	-	-		

портных механизмов системы DAB могут быть переданы одновременно:

- несколько звуковых программ с разным уровнем качества, включая звуковые форматы 1/0, 2/0, 3/2, 5.1;
- несколько телевизионных программ с монофоническим или стереофоническим сопровождением;
- различных данных, актуальных сведений для бизнесменов, подвижных и неподвижных изображений, текстовой и графической информации и пр.

Система Digital Radio Mondiale (DRM, цифровое всемирное радио) – многофункциональная система цифрового радиовещания – была впервые стандартизована ETSI в 2001 году [8]. Она вначале предназначалась для работы в радиовещательных диапазонах длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) волн, т.е. на участках частот до 30 МГц, выделенных ИТУ-Р для целей звукового вещания. В 2009 году была опубликована новая версия данного стандарта [14], в которой диапазон рабочих частот был расширен до частоты 240 МГц. В этой версии стандарта добавлен режим работы E, сама версия системы при работе в этом режиме в ряде публикаций получила название DRM+. В январе 2014 года была опубликована последняя версия данного стандарта (данные сайтов: www.itu.int, www.drm.org, www.dibeg.org).

К сожалению, пока нет массового производства приемников данного формата, распространение этой системы в мире идет гораздо более медленными темпами, но все же и здесь число стран, ориентирующихся на ее применение, достаточно велико (табл. 7). Особенно это актуально для стран с большой территорией и малой плотностью населения.

Что же касается стран Северной и Южной Америки, то в ряде них распространение получает американская система IBOC HD Radio (табл. 7).

Заключение

1. Все рекомендуемые ИТУ-Р для применения в телевидении и радиовещании цифровые системы

имеют общие особенности в обработке и передаче цифровых данных изображения и звука, к числу которых следует отнести: компрессию цифровых данных, помехоустойчивое кодирование на уровне аудио и видеофрейма, рандомизацию цифровых данных, что необходимо для более равномерного распределения энергии сигнала в полосе частот радиоканала, канальное кодирование с разным уровнем защиты отдельных частей цифровых потоков, временное перемежение цифровых данных, перемежение по частоте ячеек модуляции при формировании OFDM-символов; многочастотную модуляцию OFDM или COFDM, но с отличающимися параметрами. Именно различие в этих деталях и определяет в конечном итоге их эффективность и выбор стран для применения. Немаловажную роль при этом играет и коммерческий фактор: доступность оборудования, его стоимость, успехи на рынке информационных технологий, политические аспекты.

2. Анализ публикаций отдельных авторов, отчетов и рекомендаций ИТУ-Р свидетельствует, что в мире активно продвигаются две платформы цифровых технологий телевидения и радиовещания: европейская (системы DVB-T, DVB-T2, DAB, DRM) и американская (системы ISDB-TSB, IBOC HD Radio AM, IBOC HD Radio FM). Все же наибольшее число стран ориентируется на европейскую платформу цифрового ЦТРВ.

3. Наибольшее распространение в мире получают системы DVB-T2 и DAB, что вполне оправданно с точки зрения качества, требуемого радиочастотного ресурса и востребованности населением. Продвижение системы DRM, несмотря на ее высокую эффективность, идет достаточно медленно, что, по-видимому, объясняется также и отсутствием массового производства недорогих приемников данного формата.

Литература

1. Дворкович, В. П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.

2. Rep. ITU-R BT.2043 (2004) Television systems used in different countries/geographical areas.
3. ETSI EN 302 755 V1.3.1 (2012-04). Digital Audio Broadcasting (DVB); frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2).
4. Специальный отчет о переходе на цифровое радиовещание [Электронный ресурс] // Новости-МСЭ. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <https://itunews.itu.int/ru/Note.aspx?Note=5835>, свободный. – Загл. с экрана.
5. ETSI ETS 300401. Radio Broadcasting System; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, May 1997.
6. Кацнельсон, Л. Н. Системы звукового и мультимедийного цифрового радиовещания: научно-техническое издание / Л.Н. Кацнельсон. – СПб.: Линк, 2011. – 348 с.
7. ETSI EN 300 401 V1.4.1 (2006-01). Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers.
8. ETSI ES 201 980 V3.2.1 (2012-06). Digital Radio Mondiale (DRM) system Specification.
9. National radio systems committee, NRSC-5-C, In-band/on-channel Digital Radio Broadcasting Standard, September, 2011.
10. ETSI EN 300 401 V2.1.1 (2016-10). Radio Broadcasting System; Digital Audio Broadcasting to mobile, portable and fixed receivers.
11. ETSI TS 102 428 V1.2.1 (2009-04). Digital Audio Broadcasting (DAB); DMB video service; User application specification.
12. ETSI TS 102 427 V.1.1.1(2005-07) Digital Audio Broadcasting (DAB); Data Broadcasting - MPEG-2 TS streaming.
13. Смирнов, А. В. Цифровое телевидение (от теории и к практике) / А.В. Смирнов., Пескин А.Е. – М.: Техноспфера, 2011. – 352 с.
14. Кацнельсон, Л. Н. Системы цифрового радиовещания DAB, DAB+, DMB. Современное состояние / Л.Н. Кацнельсон // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2015. – № 1. – С. 25.
15. ISO/IEC 13818-3:1998. Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information. Part 3: Audio.
16. International Standard ISO/IEC 13818-7. Information technology – Generic coding of pictures and associated audio information. Part 7: Advanced Audio Coding (AAC), 1997 (E).
17. ISO/IEC FCD 14496-3 Subpart 1. Information Technology-Very Low Bitrate Audio-Visual Coding. Part 3: Audio, 1998-05-10 (ISO/JTC 1/SC 29, N2203).
18. ISO/IEC 23003-1:2007, “Information Technology – MPEG Audio Technologies. Part 1: MPEG Surround,” International Standards Organization, Geneva, Switzerland (2007).
19. ETSI TS 102 428 V1.2.1 (2009-04). Digital Audio Broadcasting (DAB); DMB video service; User application specification.
20. Рекомендация МСЭ-R (02/2014). Радиовещание для приема на подвижные портативные приемники сигналов мультимедийных применений и применений передачи данных.
21. Report ITU-R BT.2049-7 (02/2016). Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception.
22. Рекомендация МСЭ-RBS.1114-6(1994-1995-2001-2002-2003-2004-2007). Системы наземного цифрового звукового радиовещания на автомобильные, переносные и стационарные приемники в диапазоне частот 30–3000 МГц.
23. Рекомендация МСЭ-R BS.1660-6 (08/2012). Техническая основа для планирования наземного цифрового звукового радиовещания в полосе ОВЧ.
24. ГОСТ Р 54309–2011. Аудиовизуальная информационная система реального времени (РАВИС). Процессы формирования кадровой структуры, канального кодирования и модуляции для системы цифрового наземного узкополосного радиовещания в ОВЧ диапазоне. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2012. – 39 с.
25. Report ITU-R BT.2140-7 (04/2014) Transition from analogue to digital terrestrial broadcasting.
26. ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2009-01) Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.

Попов / Popov D.

Дмитрий Иванович

(ador@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный

радиотехнический университет»,

профессор.

г. Рязань

Ключевые слова: адаптивные фильтры – adaptive filters; доплеровская фаза – doppler phase; коэффициенты корреляции – correlation coefficients; обработка сигналов – signal processing; пассивные помехи – passive interference; точность оценивания – accuracy of estimation; функция правдоподобия – likelihood function.

В статье проведен анализ адаптивной квазиоптимальной системы «режекторный фильтр – многоканальный фильтр». Установлена связь между подавлением помехи в системе и ошибками адаптации весовых коэффициентов адаптивных режекторного и многоканального фильтров к неизвестным параметрам помехи. Полученные соотношения позволяют выбирать объем обучающей выборки в зависимости от заданной величины потерь адаптации, спектрально-корреляционных свойств помехи и структуры системы обработки.

The article analyzes the adaptive quasi-optimal system "notch filter - multichannel filter." A relationship between interference cancellation in the system and errors in adaptation of the weight coefficients of adaptive notch and multichannel filters to unknown interference parameters has been established. The obtained relationships make it possible to choose the volume of the training sample depending on the set value of the adaptation loss, the spectral-correlation properties of the interference, and the structure of the processing system.

Введение

При проектировании систем обработки радиолокационных сигналов одной из актуальных и трудных неизменно остается проблема выделения сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех, создаваемых мешающими отражениями от неподвижных или медленно перемещающихся объектов [1]. Пассивные помехи, интенсивность которых может значительно превышать уровень собственных шумов приемника, существенно нарушают нормальную работу радио-

локационных систем, приводя к перегрузкам приемного тракта и, как следствие этого, к потере полезных сигналов [2].

Оптимальная обработка когерентно-импульсных сигналов на фоне пассивных помех включает матричную фильтрацию обрабатываемых отсчетов с последующим многоканальным когерентным суммированием (накоплением) результатов матричной фильтрации [3, 4]. При марковских аппроксимациях помехи матричный фильтр преобразуется в векторный режекторный фильтр (РФ), приводя к традиционной квазиоптимальной структуре «режекторный фильтр – многоканальный фильтр (МФ)». В случае произвольных корреляционных свойств помехи характеристики РФ и МФ следует оптимизировать с целью повышения и приближения эффективности системы квазиоптимальной обработки к эффективности системы оптимальной обработки.

В работе [5] для систем квазиоптимальной обработки сигналов при наличии пассивных помех предложены методы поэтапной оптимизации режекторного и многоканального фильтров, основанные на экстремальных свойствах характеристических (собственных) чисел матриц и позволяющие приблизиться к эффективности оптимальной системы.

Априорная неопределенность корреляционных характеристик пассивных помех существенно затрудняет реализацию эффективного обнаружения движущихся целей. Преодоление параметрической априорной неопределенности основывается на замене в соответствии с методологией адаптивного байесовского подхода неизвестных параметров помехи их состоятельными оценками, в частности оценками максимального правдоподобия (ОМП) [6], и последующем построении адаптивных алгоритмов и систем обработки [7].

В работе [7] рассмотрены критерии и алгоритмы адаптации нерекурсивных РФ и принципы адаптации МФ к неизвестным корреляционным характеристикам

пассивных помех. Предложенная процедура адаптации приводит к адаптивной перестройке порядка и весовых коэффициентов фильтров и позволяет в условиях априорной неопределенности приблизиться к эффективности оптимальной системы. Синтезированы алгоритмы оценивания и приведена структурная схема измерителя коэффициентов межпериодной корреляции помехи на выходе автокомпенсатора доплеровской фазы пассивной помехи.

Эффективность предложенных адаптивных алгоритмов зависит от погрешностей оценивания неизвестных характеристик помехи, что приводит к задаче выбора одного из основных параметров адаптивных алгоритмов – объема обучающей выборки. Представляет интерес анализ точности оценивания неизвестных характеристик помехи и использование полученных результатов для анализа эффективности адаптивных систем обработки сигналов на фоне помех.

Функция правдоподобия

В когерентно-импульсном радиолокаторе для оценивания параметров пассивной помехи используются цифровые отсчеты $U_{jl} = x_{jl} + iy_{jl}$ (где j и l – номера периода повторения и элемента разрешения по дальности соответственно) комплексной огибающей входных данных, следующие через период повторения T и образующие в l -м элементе разрешения по дальности вектор-столбец $U_l = \{U_{jl}\}^T$, $j = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, n+1}$. Пассивная помеха, создаваемая отражениями от протяженных объектов, располагается во временном строке и образует в пределах $n+1$ смежных элементов разрешения по дальности обучающую выборку в виде совокупности $U = \{U_l\} = \{U_1, \dots, U_{n+1}\}$. При этом соответствующий среднему элементу разрешения в строке вектор U_l ($l = n/2 + 1$) исключается из обучающей выборки [3, 7].

Пассивные помехи, как правило, создаются множественными отражателями и поэтому являются случайными узкополосными процессами гауссовского типа. Помеха в различных элементах разрешения по дальности ввиду полной смены элементарных отражателей является статистически независимой с однородными статистическими характеристиками в пределах рассматриваемого временного строка. При этом в каждом элементе разрешения данного строка помеха описывается корреляционной матрицей $R_l = U_l U_l^{*T} / 2 = R$.

Корреляционная матрица R или ее параметры априори неизвестны и являются предметом оценивания в задачах адаптивной обработки сигналов. Зависимость входных данных в виде совокупности $U = \{U_l\} = \{U_1, \dots, U_{n+1}\}$ от матрицы R описывается функцией правдоподобия (ФП)

$$P(U/R) = (2\pi)^{-Nn} \det^{-n} R \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq \frac{n}{2}+1}}^{n+1} U_l^{*T} R^{-1} U_l \right), \quad (1)$$

где R^{-1} – матрица, обратная по отношению к матрице R , элементы которой при симметричном спектре помехи $R_{jk} = \sigma^2 \rho_{jk} e^{i(j-k)\Phi} + \sigma_{\text{ш}}^2 \delta_{jk}$; σ^2 – дисперсия отсчетов пассивной помехи, ρ_{jk} – коэффициенты межпериодной корреляции помехи, Φ – доплеровский сдвиг фазы помехи за период повторения T , $\sigma_{\text{ш}}^2$ – дисперсия собственного шума, δ_{jk} – символ Кронекера.

Применительно к адаптивной обработке сигналов на фоне помех необходимо измерять соответствующие первой строке матрицы R оценки коэффициентов межпериодной корреляции пассивной помехи $\hat{\rho}_{1k}$ и оценку доплеровского сдвига фазы помехи $\hat{\Phi}$ [7].

Для оценивания каждого коэффициента корреляции ρ_{1k} необходимы исходные данные двух соответствующих периодов повторения (j -го и $(j+k-1)$ -го) в виде векторов $U_l = \{U_{jl}, U_{j+k-1,l}\}^T$, $l = \overline{1, n+1}$, образующих совокупность $U = \{U_l\}$. Для оценивания доплеровского сдвига фазы помехи Φ достаточно данных двух смежных периодов повторения (j -го и $(j+1)$ -го), представленных в одном элементе разрешения вектором $U_l = \{U_{jl}, U_{j+1,l}\}^T$, $l = \overline{1, n+1}$, а во временном строке – совокупностью $U = \{U_l\}$.

Точность оценивания параметров помехи

С учетом асимптотической эффективности и асимптотической нормальности распределения ОМП неизвестных параметров помехи точность оценивания будем характеризовать дисперсией оценки, определяемой с помощью выражения Крамера-Рао [8], указывающего нижнюю границу дисперсии оценки. Для дисперсии ОМП коэффициентов корреляции $\hat{\rho}_{1k}$ имеем

$$\sigma_{\hat{\rho}_{1k}}^2 = -\left[\partial^2 \ln P(U/\rho_{1k}) / \partial (\rho_{1k})^2 \right]^{-1}.$$

Используя ФП (1) для j -го и $(j+k-1)$ -го периодов ($N=2$), после соответствующих вычислений получим

$$\sigma_{\hat{\rho}_{1k}}^2 = \frac{\det^2 R}{2n\sigma^4 [\det R + 2\sigma^4 (\rho_{1k})^2]} = \frac{[(1+\lambda)^2 - (\rho_{1k})^2]^2}{2n[(1+\lambda)^2 + (\rho_{1k})^2]}, \quad (2)$$

где $\lambda = \sigma_{\text{ш}}^2 / \sigma^2$ – отношение шум/помеха.

Для дисперсии оценки $\hat{\Phi}$ имеем

$$\sigma_{\hat{\Phi}}^2 = -\left[\partial^2 \ln P(U/\Phi) / \partial \Phi^2 \right]^{-1}.$$

После вычислений с учетом ФП (1) при $N=2$ и $\rho_{12} = \rho$ находим

$$\sigma_{\hat{\Phi}}^2 = \frac{\det R}{2n\sigma^4 \rho^2} = \frac{(1+\lambda)^2 - \rho^2}{2n\rho^2}. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) следует, что общими факторами, определяющими точность оценивания, являются объем обучающей выборки n и корреляционные

свойства помехи, влияние которых рассмотрим при гауссовской функции корреляции помехи: $\rho_{1k} = \rho^{(k-1)^2} = \exp\{-\pi^2[(k-1)\beta]^2/2,8\}$, где $\beta = \Delta f T$ – нормированная ширина спектра помехи. На рис. 1, 2 приведены кривые, характеризующие зависимости среднеквадратичных ошибок $\sigma_{\hat{\rho}}$ и $\sigma_{\hat{\phi}}$ от числа усредняемых элементов обучающей выборки n при $\lambda \leq 10^{-4}$. Сплошные кривые соответствуют расчетам по формуле (2) при $\rho_{1k} = \rho_{12} = \rho$ и формуле (3), а штриховые кривые – эмпирическим результатам, полученным путем имитационного статистического моделирования на ПЭВМ соответствующих алгоритмов оценивания. Достаточно близкое совпадение результатов моделирования и расчетов при $n > 8$ подтверждает асимптотическую эффективность ОМП неизвестных параметров помехи. Из кривых видно, что параметр β существенно влияет на точность оценивания. Увеличение уровня некоррелированного шума приводит к заметному снижению точности при сравнительно высоком отношении λ .

Анализ систем адаптивной обработки сигналов

Рассмотрим когерентную обработку последовательности N цифровых отсчетов $U_j = x_j + i y_j$, $j = \overline{1, N}$, комплексной огибающей на выходе радиолокационного приемника. Остатки пассивной помехи на выходе системы адаптивной обработки сигналов, состоящей из каскадного соединения адаптивных режекторного фильтра (АРФ) и многоканального фильтра (АМФ) [7], можно представить в виде

$$V_r = \sum_{j=m+1}^N \hat{H}_{jr} \sum_{p=0}^m \hat{G}_p U_{j-p},$$

где \hat{G}_p и \hat{H}_{jr} – коэффициенты импульсных характеристик соответственно АРФ и r -го доплеровского канала АМФ, причем, $\hat{G}_p = \hat{g}_p e^{ip\hat{\phi}}$ и $\hat{H}_{jr} = \hat{h}_j W^{-(j-1)(r-1)}$, $W = e^{i\psi} = e^{i2\pi/(N-m)}$, $r = \overline{1, N-m}$.

Для последующего анализа величину V_r удобно представить в виде

$$V_r = \sum_{j=m+1}^N \sum_{p=0}^m \hat{h}_j \hat{g}_p W^{-(j-1)(r-1)} e^{ip\hat{\phi}} U_{j-p}.$$

С учетом независимости оценок параметров помехи и отсчетов обрабатываемого элемента разрешения, исключаемых из обучающей выборки, для дисперсии величины V_r найдем:

$$\sigma_{V_r}^2 = \frac{1}{2} \overline{V_r V_r^*} = \frac{1}{2} \sum_{j,k=m+1}^N \sum_{p,s=0}^m \overline{\hat{h}_j \hat{h}_k \hat{g}_p \hat{g}_s} \times \\ \times \overline{W^{-(j-k)(r-1)} e^{i(p-s)\hat{\phi}} U_{j-p} U_{k-s}^*}.$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{2} \overline{e^{i(p-s)\hat{\phi}} U_{j-p} U_{k-s}^*} = \sigma^2 \rho(j-p, k-s) \times \\ \times \overline{\exp[i(j-p-k+s)(\varphi - \hat{\phi})]} + \sigma_{ш}^2 \delta_{j-p, k-s}$$

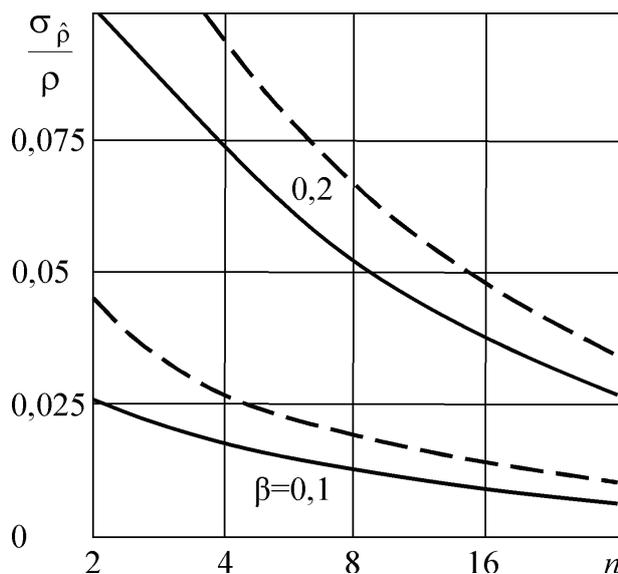


Рис. 1. Зависимости среднеквадратичной ошибки измерения коэффициента корреляции помехи от объема обучающей выборки

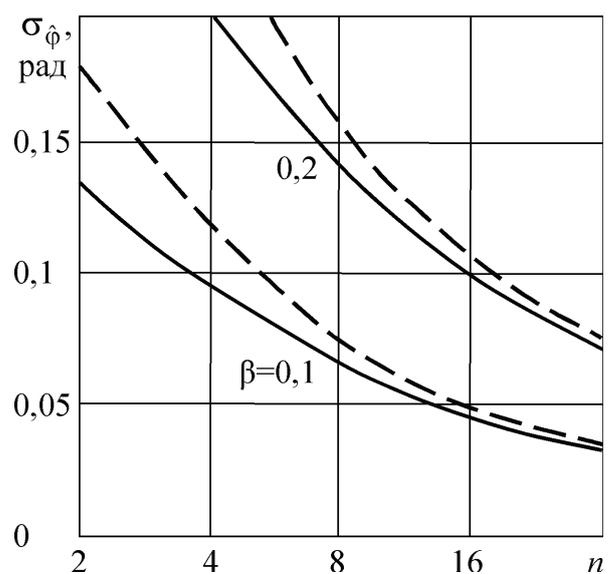


Рис. 2. Зависимости среднеквадратичной ошибки измерения доплеровской фазы помехи от объема обучающей выборки

и

$$W^{-(j-k)(r-1)} = \exp[-i(j-k)(r-1)\psi],$$

$$\psi = 2\pi/(N-m),$$

получим

$$\begin{aligned} \sigma_V^2 = \sigma^2 \sum_{j,k=m+1}^N \sum_{p,s=0}^m \overline{\hat{h}_j \hat{h}_k \hat{g}_p \hat{g}_s} \rho(j-p, k-s) \times \\ \times \overline{\cos[(j-k-p+s)(\varphi-\hat{\varphi}) - (j-k)(r-1)\psi]} + \\ + \sigma_{\text{ш}}^2 \sum_{j=m+1}^N \sum_{p=0}^m \overline{\hat{h}_j^2 \hat{g}_p^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Полагая, что форма огибающей корреляционной функции помехи известна и весовые коэффициенты АМФ и АРФ определяются в результате функциональных преобразований $\hat{h}_j = h_j(\hat{\rho})$ и $\hat{g}_p = g_p(\hat{\rho})$ [7], произведем соответствующие усреднения в (4), применяя асимптотические свойства ОМП параметров помехи $\hat{\rho}$ и $\hat{\varphi}$ – асимптотическую нормальность и асимптотическую эффективность [6, 8].

Рассмотрим линейную аппроксимацию зависимостей $\hat{h}_j = h_j(\hat{\rho})$ в окрестности $\hat{\rho} = \rho$ в виде $\hat{h}_j = h_j + (\hat{\rho} - \rho)h'_j$, где $h_j = h_j(\rho)$. Производные $h'_j = h'_j(\rho) = \partial h_j(\rho) / \partial \rho$ в связи с отсутствием аналитической зависимости $h_j(\rho)$ определим методом конечных разностей:

$$h'_j = [h_j(\rho + \Delta\rho) - h_j(\rho)] / \Delta\rho.$$

Используя линейную аппроксимацию $\hat{h}_j = h_j + (\hat{\rho} - \rho)h'_j$ при усреднении в (4), с учетом асимптотической нормальности распределения ОМП $\hat{\rho}$ со средним ρ и дисперсией $\sigma_{\hat{\rho}}^2$ получим

$$\overline{\hat{h}_j \hat{h}_k} = \overline{[h_j + (\hat{\rho} - \rho)h'_j][h_k + (\hat{\rho} - \rho)h'_k]} = h_j h_k + \sigma_{\hat{\rho}}^2 h'_j h'_k.$$

Аналогично рассмотрим линейную аппроксимацию зависимостей $\hat{g}_p = g_p(\hat{\rho})$ в окрестности $\hat{\rho} = \rho$ в виде $\hat{g}_p = g_p + (\hat{\rho} - \rho)g'_p$, где $g_p = g_p(\rho)$. Используя данную аппроксимацию при усреднении в (4), с учетом асимптотической нормальности распределения оценки $\hat{\rho}$ со средним ρ и дисперсией $\sigma_{\hat{\rho}}^2$ получим

$$\overline{\hat{g}_p \hat{g}_s} = \overline{[g_p + (\hat{\rho} - \rho)g'_p][g_s + (\hat{\rho} - \rho)g'_s]} = g_p g_s + \sigma_{\hat{\rho}}^2 g'_p g'_s.$$

Учитывая асимптотическую нормальность распределения ОМП $\hat{\varphi}$ со средним φ и дисперсией $\sigma_{\hat{\varphi}}^2$, найдем

$$\begin{aligned} \overline{\cos[(j-k-p+s)(\varphi-\hat{\varphi}) - (j-k)(r-1)\psi]} = \\ = \cos[-(j-k)(r-1)\psi] \exp[-(j-k-p+s)^2 \sigma_{\hat{\varphi}}^2 / 2]. \end{aligned}$$

С учетом проведенных усреднений для коэффициента подавления помехи получим

$$\begin{aligned} \gamma = \frac{\sigma_V^2}{\sigma^2} = \sum_{j,k=m+1}^N \sum_{p,s=0}^m h_j h_k g_p g_s \rho(j-p, k-s) \times \\ \times \cos[-(j-k)(r-1)\psi] \exp[-(j-k-p+s)^2 \sigma_{\hat{\varphi}}^2 / 2] + \\ + \lambda \sum_{j=m+1}^N \sum_{p=0}^m h_j^2 g_p^2 + \\ + \sigma_{\hat{\rho}}^2 \left\{ \sum_{j,k=m+1}^N \sum_{p,s=1}^{m-1} h_j h_k g'_p g'_s \rho(j-p, k-s) \times \right. \\ \times \cos[-(j-k)(r-1)\psi] \exp[-(j-k-p+s)^2 \sigma_{\hat{\varphi}}^2 / 2] + \\ \left. + \lambda \sum_{j=m+1}^N \sum_{p=1}^{m-1} h_j^2 g_p'^2 \right\} + \\ + \sigma_{\hat{\rho}}^2 \left\{ \sum_{j,k=m+1}^N \sum_{p,s=0}^m h'_j h'_k g_p g_s \rho(j-p, k-s) \times \right. \\ \times \cos[-(j-k)(r-1)\psi] \exp[-(j-k-p+s)^2 \sigma_{\hat{\varphi}}^2 / 2] + \\ \left. + \lambda \sum_{j=m+1}^N \sum_{p=0}^m h_j'^2 g_p^2 \right\} + \\ + \sigma_{\hat{\rho}}^4 \left\{ \sum_{j,k=m+1}^N \sum_{p,s=1}^{m-1} h'_j h'_k g'_p g'_s \rho(j-p, k-s) \times \right. \\ \times \cos[-(j-k)(r-1)\psi] \exp[-(j-k-p+s)^2 \sigma_{\hat{\varphi}}^2 / 2] + \\ \left. + \lambda \sum_{j=m+1}^N \sum_{p=1}^{m-1} h_j'^2 g_p'^2 \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты h_j образуют вектор $\mathbf{h} = \{h_j\}$, оптимальное значение которого определяется на основе максимизирующего выражение (4) работы [5] решения матричного уравнения в виде собственного вектора соответствующей матрицы. Коэффициенты h'_j определяются численно методом конечных разностей.

Коэффициенты g_p определяются по алгоритмам, соответствующим критерию (3) работы [7]. Для РФ 2-го порядка ($m = 2$) имеем

$$g_0 = g_2 = 1, \quad g_1 = -2\rho.$$

Для РФ 3-го порядка необходимо использовать априорную информацию о форме огибающей функции корреляции помехи. Например, для гауссовской функции ($\rho_{1k} = \rho^{(k-1)^2}$) при $m = 3$ получаем

$$g_0 = -g_3 = 1, \quad g_1 = -g_2 = -(\rho + \rho^2 + \rho^3).$$

Для коэффициентов g'_p при $m = 2$ имеем $g'_1 = -2$, а при $m = 3$ – $g'_1 = -g'_2 = -(1 + 2\rho + 3\rho^2)$.

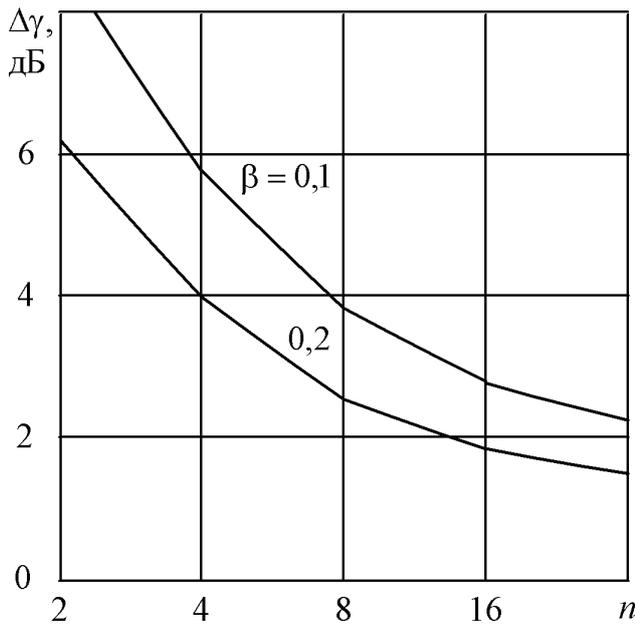


Рис. 3. Зависимости потерь в коэффициенте подавления помехи от объема обучающей выборки

Дисперсии оценок $\hat{\rho}$ и $\hat{\phi}$ определяются в соответствии с выражениями (2) и (3).

Потери в коэффициенте подавления помехи находятся из соотношения

$$\Delta\gamma = \gamma/\gamma_0, \quad (6)$$

где γ_0 – коэффициент подавления помехи без учета ошибок адаптации, определяемый с помощью выражения (5) при $\sigma_{\hat{\rho}}^2 = 0$ и $\sigma_{\hat{\phi}}^2 = 0$.

На рис. 3 приведены зависимости потерь $\Delta\gamma$ в коэффициенте подавления помехи от объема обучающей выборки n для системы когерентной обработки сигналов при $N = 8$, $m = 3$, $\lambda = 10^{-6}$ и двух значений нормированной ширины гауссовского спектра помехи – $\beta = 0,1$ и $0,2$. Как видим, величина потерь зависит от объема обучающей выборки и ширины спектра. С расширением спектра помехи потери уменьшаются, так как при этом снижается эффективность системы обработки и вследствие этого уменьшается чувствительность к ошибкам адаптации.

В целом, соотношения (5) и (6) и аналогичные рис. 3 кривые позволяют выбирать объем обучающей выборки в зависимости от заданной величины потерь адаптации, спектрально-корреляционных свойств помехи и структуры системы обработки.

Заключение

Полученные на основе выражения Крамера-Рао соотношения устанавливают связь между точностью оценивания неизвестных параметров помехи и объемом

обучающей выборки и спектрально-корреляционными свойствами помехи.

Достаточно близкое совпадение результатов расчета с эмпирическими результатами, полученными путем имитационного статистического моделирования на ПЭВМ соответствующих алгоритмов оценивания, подтверждает асимптотическую эффективность используемых при адаптации систем обработки оценок максимального правдоподобия.

Проведенный на основе асимптотических свойств оценок максимального правдоподобия анализ эффективности систем обработки устанавливает связь между подавлением помехи в системе и ошибками адаптации к неизвестным параметрам помехи.

Полученные в результате проведенного анализа соотношения (5) и (6) и аналогичные рис. 3 кривые позволяют выбирать объем обучающей выборки в зависимости от заданной величины потерь адаптации, спектрально-корреляционных свойств помехи и структуры системы обработки.

Литература

1. Melvin, W. L. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques / W.L. Melvin, J.A. Scheer (Eds.). – New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. – 846 p.
2. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
3. Попов, Д. И. Оптимальная обработка многочастотных сигналов / Д.И. Попов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2013. – Вып. 1. – С. 32–39.
4. Richards, M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition / M.A. Richards. – New York : McGraw-Hill Education, 2014. – 618 p.
5. Попов, Д. И. Оптимизация систем когерентной обработки сигналов на фоне помех / Д.И. Попов // Информация и Космос. – 2015. – № 4. – С. 6–9.
6. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.
7. Попов, Д. И. Адаптивная обработка когерентных сигналов на фоне помех / Д.И. Попов // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 25–30.
8. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер; пер. с англ. под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1975 – 648 с.

К вопросу о применении беспилотных летательных аппаратов корабельного базирования в качестве ретрансляторов в системах обмена информацией

To the question about the use of ship-based unmanned aerial vehicles as repeaters in systems for the exchange of information

Биккенин / Bikkenin R.

Рафаэль Рифгатович

(tosir@sut.ru)

доктор технических наук, профессор,

заслуженный работник высшей школы РФ.

Военный институт дополнительного профессионального образования ВУНЦ ВМФ

«Военно-морская академия имени Адмирала Флота

Советского Союза Н. Г. Кузнецова»

(ВМА им. Н. Г. Кузнецова) МО РФ,

доцент кафедры боевого применения средств связи.

г. Санкт-Петербург

Андрюков / Andrukov A.

Алексей Анатольевич

(aaa260977@yandex.ru)

Военный институт дополнительного

профессионального образования ВУНЦ ВМФ

ВМА им. Н. Г. Кузнецова,

преподаватель кафедры боевого применения средств связи.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат – unmanned aerial vehicle; ретрансляция радиосигналов – relaying radio signals; военный корабль – warship; система обмена информацией – information exchange system; радиоэлектронная борьба – electronic warfare; относительная фазовая модуляция второго порядка – double differential phase shift keying.

Рассмотрены вопросы применения беспилотных летательных аппаратов корабельного базирования в качестве ретрансляторов радиосигналов. Представлены основные требования к этим аппаратам. Показана возможность помехозащищенной ретрансляции в условиях радиоэлектронной борьбы при использовании псевдослучайных сигналов и относительной фазовой модуляции второго порядка.

The using of ship-bases unmanned aerial vehicles as repeaters of radio signals is considered. The main requirements for these devices are presented. The possibility of the antijamming relay in case of radio-electronic warfare is shown. In this case the authors propose to use pseudorandom signals and the double differential phase shift keying.

В настоящее время решение многих проблем национальной безопасности России возложено на Вооруженные Силы. Ряд задач, в том числе борьба с Международным терроризмом, решается совместно с органами Государственной безопасности. Вооруженные Силы РФ успешно выполняют поставленные Президентом

РФ боевые задачи в Сирийской Арабской Республике, а также продолжают борьбу с пиратами и обеспечивают безопасность мореплавания гражданских судов в районе Африканского Рога в Индийском океане. Помимо Воздушно-космических сил уничтожением объектов и живой силы Исламского государства, запрещенного в России, на территории Сирии заняты корабли Военно-Морского Флота, группировка которых находится в Средиземном море.

Успешность решения названных задач во многом определяется устойчивостью и оперативностью управления боевыми силами и оружием, что в значительной степени обеспечивается существующей организацией связи и обмена информацией, в том числе в корабельных соединениях.

Для повышения эффективности управления группировкой кораблей могут быть использованы беспилотные летательные аппараты (БЛА), которые в последнее время привлекают все большее внимание специалистов. Современные беспилотные аппараты способны решать множество задач в интересах силовых ведомств и гражданских организаций. В частности, в военных целях БЛА применяются для решения следующих задач [1]:

- ведение разведки и мониторинга района боевых действий;
- нанесение ударов по противнику;
- ретрансляция сигналов радиосвязи;
- радиоэлектронное подавление каналов радиосвязи и других радиоэлектронных средств;
- обеспечение операций информационного противоборства;

– поиск кораблей и других объектов и их экипажей в аварийных ситуациях и др.

К числу несомненных достоинств БЛА, определяющих успешность их применения, можно отнести ряд факторов:

– они способны обеспечивать решение задач практически в реальном масштабе времени, находясь в течение длительных временных промежутков в оперативно-важных районах действия сил и войск, например с целью ведения разведки, мониторинга передвижения своих сил или осуществляя постановку преднамеренных помех радиоэлектронным средствам противника;

– сравнительно невысокую стоимость по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами. Так, по оценке, представленной в [1], стоимость серийно выпускаемых боевых БЛА будет составлять порядка 25–40% от стоимости современных истребителей, при этом расходы на эксплуатацию окажутся примерно на 80% ниже;

– высокая мобильность БЛА, заключающаяся в возможности быстро изменять район их применения. В зависимости от конкретной обстановки данные аппараты легко могут переброшены на любой, даже самый отдаленный, театр военных действий – сухопутный или морской;

– возможность эффективного применения БЛА над территорией, занятой противником, или в зоне действий корабельных группировок противника во всей глубине его боевых порядков в различных районах Мирового океана, а в мирное время в непосредственной близости к государственным границам, в том числе и над сопредельной территорией иностранного государства;

– высокая степень разведзащищенности БЛА, вытекающая из их небольших размеров и, следовательно, малой радиолокационной заметности;

– возможность использования БЛА группой кораблей в качестве ложных целей при отражении ракетной атаки;

– в некоторых ситуациях БЛА решают боевые задачи не хуже, а иногда и с большей эффективностью, чем экипажи пилотируемой авиации, поэтому при соответствующей замене это будет способствовать существенному снижению потерь военных летчиков и пилотируемой техники, а также уменьшению негативного влияния человеческого фактора, в том числе невысокой квалификации, физической и моральной усталости;

– возможность применения БЛА в корабельных группировках, не имеющих палубной пилотируемой авиации и в сложных метеоусловиях, в том числе в условиях быстро изменяющейся обстановки.

Теперь о недостатках БЛА. К ним следует отнести:

– значительные проблемы в управлении БЛА и обмене информацией с ними. В частности, пока еще сложными в решении остаются вопросы криптографической защиты передаваемой информации, защиты от воздействия на БЛА средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) противника и создание эффективно действу-

ющей сети при одновременном нахождении в воздухе нескольких БЛА;

– необходимость сопряжения с боевой информационно-управляющей системой корабля и комплексного использования БЛА в интересах одновременного выполнения нескольких полетных заданий, в том числе ведения разведки и передачи полученной информации, ретрансляции сигналов радиосвязи и других при дефиците пропускной способности канала обмена информацией, особенно, в условиях РЭБ [2];

– обеспечение необходимых характеристик эксплуатационной надежности в сложных условиях боевого применения БЛА, а также безопасности их взлета и посадки на корабле;

– сложности при решении задачи оптимизации полезной бортовой нагрузки и требуемых полетных характеристик БЛА, включая дальность, высоту полета, время нахождения в воздухе, «знание» своего места, простоту в управлении.

В целом, несмотря на указанные здесь недостатки, а также другие нерешенные проблемы при создании и эксплуатации БЛА, по мнению специалистов [2, 3, 4], процесс их развития и расширения областей применения стал необратимым и динамичным.

Одной из названных здесь задач является ретрансляция радиосигналов с целью расширения возможностей наземных и морских систем радиосвязи и управления, функционирующих в диапазонах очень высоких (ОВЧ) и ультравысоких (УВЧ) частот, что соответствует метровым и дециметровым длинам радиоволн. Эти диапазоны, как известно, сейчас весьма востребованы для профессиональной радиосвязи, в том числе мобильной (сотовой) связи.

По мнению специалистов, БЛА в роли ретрансляторов должны быть способны выполнять задачи ретрансляции в течение продолжительного времени на значительной высоте и потреблять минимально возможное количество энергии. Только в этом случае БЛА способны обеспечить увеличение радиуса действия систем обмена информацией в течение всего срока выполнения поставленных задач.

Среди БЛА, которые предназначаются для ретрансляции радиосигналов, определенную перспективу имеют аппараты вертолетного типа с вертикальным взлетом и посадкой. Это позволяет применять их с неподготовленных специальным образом наземных площадок, а также с палуб военных кораблей. Последнее особенно важно, поскольку с учетом корабельной архитектуры, практически все современные боевые корабли, включая новейшие фрегаты проекта 11356 (головной – «Адмирал Григорович») и корветы проекта 20380 (головной – «Стережущий») не имеют значительного пространства на верхней палубе для взлета БЛА самолетного типа. Исключение составляет лишь тяжелый авианесущий крейсер «Адмирал Флота Советского Союза Кузнецов», единственный в Военно-Морском Флоте Российской Федерации.

В настоящее время Оборонно-промышленный комплекс РФ создает БЛА (tailsitter) следующего поколения «Фазан» [5]. Новый аппарат создается как для гражданского применения, так и в интересах Вооруженных Сил. Это будет вертикально взлетающий и садящийся беспилотный самолет, что позволит ему быть БЛА корабельного базирования. Его масса при взлете, предположительно, будет составлять примерно 500 кг, из которых примерно 60 кг составит полезная нагрузка. Имея скорость 350 км/час «Фазан», сможет находиться в воздухе до 6 часов и преодолевать расстояние порядка 2000 км.

Помимо этого сейчас проходит испытания БЛА – конвертоплан, созданный в Санкт-Петербурге. Данный аппарат, названный «Конверт-8» совмещает в себе функции самолета и вертолета. Этот БЛА может двигаться со скоростью самолета, но при этом способен зависать в воздухе, осуществлять взлет и посадку вертикально, как вертолет и поэтому также имеет перспективу как БЛА корабельного базирования.

По данным специалистов [6], американская компания Northrop Grumman создает БЛА по схеме tailsitter, то есть беспилотного самолета с вертикальным взлетом и посадкой. Этот аппарат в США предполагается применять на эсминцах, оборудованных вертолетными посадочными площадками. Испытания данного беспилотного самолета в корабельных условиях запланированы на 2018 г.

В корабельных условиях в качестве ретрансляторов предпочтительно применение легких БЛА с взлетной

массой 50...100 кг и высотой полета на средних высотах более 1000 м и до 4000 м включительно. Такие летательные аппараты должны оснащаться преимущественно ненаправленными или слабонаправленными антенными системами. В этом случае зона покрытия радиосигналами составит значительную площадь. Это позволит БЛА обеспечить управление кораблями в тактическом звене, реализуя, по существу, загоризонтный обмен информацией на значительных расстояниях между кораблями группировки, и выполнять свои функции при нахождении кораблей в различных точках относительно ретранслятора, «висящего» в назначенном месте.

С другой стороны это имеет и отрицательную сторону – низкую разведзащищенность и высокую степень доступности БЛА воздействию преднамеренных помех противника средствами РЭБ. Поэтому необходимо предусмотреть специальные режимы ретрансляции в условиях воздействия средств РЭБ противника. Как отмечается в [7], определенную перспективу решения этой задачи открывает использование БЛА вертолетного типа, оснащенных ретрансляторами радиосигналов DSAR+.

DSAR+ (Digital Signal Active Repeater) – ретранслятор цифровых радиосигналов, предназначенный для организации подвижной связи, мониторинга, контроля и управления в тактическом звене. Он имеет возможность повысить эффективность ведения радиоэлектронной борьбы, помехозащищенность связи и управления войсками и силами, а также снизить электро-

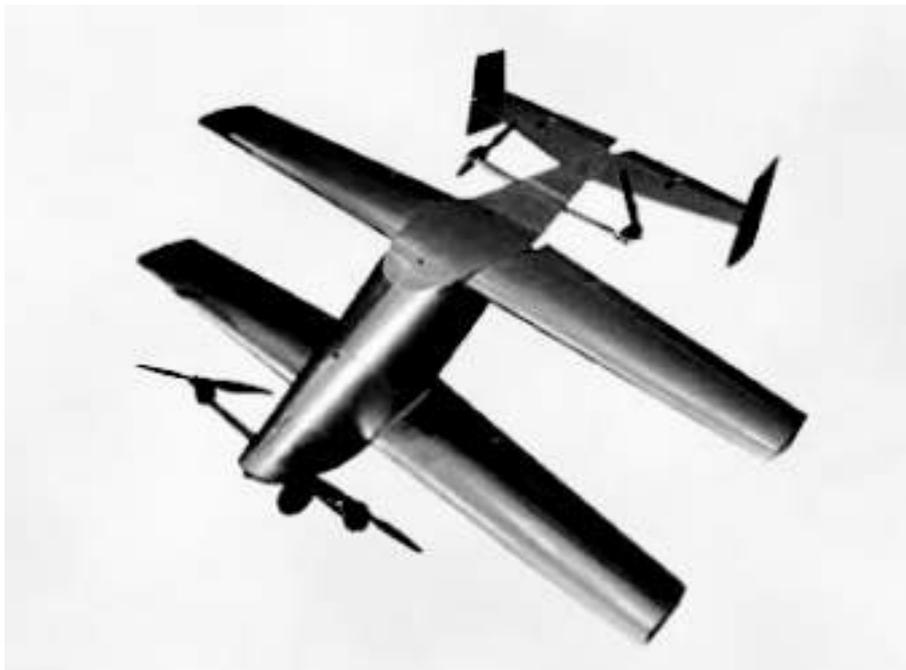


Рис. 1. Беспилотный летательный аппарат «Конверт-8».

Фото с сайта <http://aviation21.ru/tag/konvert-8/>

магнитную доступность для средств радиоразведки противника. Данное устройство может также использоваться в качестве имитатора сигналов для дезинформации противника с целью отвлечения систем огневого поражения и РЭБ.

Для точного определения своего места и удержания в течение необходимого времени в заданной точке, БЛА должен быть оснащен оборудованием российской спутниковой системы навигации ГЛОНАСС. В мирное время вопросы навигации БЛА могут также решаться посредством глобальной международной системы GPS, которая в военное время в любой момент может прекратить обслуживание российских беспилотных аппаратов.

Несложно показать, что дальность устойчивого обмена информацией в УКВ диапазоне с учетом нахождения БЛА на высотах, указанных выше, существенно увеличивается. Об этом свидетельствуют простейшие расчеты по известной эмпирической формуле [8]:

$$D_{\text{км}} \approx 3,57(\sqrt{h_{1\text{м}}} + \sqrt{h_{2\text{м}}}), \quad (1)$$

где $h_{1\text{м}}$ – высота первой антенны в метрах, $h_{2\text{м}}$ – высота второй антенны в метрах, $D_{\text{км}}$ – дальность связи в километрах, при этом, $h_{1\text{м}}, h_{2\text{м}} \ll R_3$ ($R_3 \approx 6371$ км – средний радиус Земли).

Графические зависимости примерных величин дальностей УКВ радиосвязи между кораблем и БЛА от высоты полета беспилотного аппарата при известных значениях высот расположения на мачтах корабельных антенн, рассчитанные по (1), представлены на рис. 2. (Кривая 1 – 20 м, малый противолодочный корабль проекта 1234, 2 – 30 м, ракетный крейсер «Варяг», 3 – 40 м, фрегат «Адмирал Григорович»).

Видно, что использование БЛА в качестве ретранслятора позволяет расширить зону устойчивого обмена информацией между кораблями до нескольких сотен километров, что существенно повышает эффективность управления в тактическом звене при решении кораблям поставленных боевых задач.

Оборудование ретранслятора радиосигналов на базе БЛА должно создаваться на основе современных стандартов и быть совместимым с существующими и перспективными радиосредствами с цифровой обра-

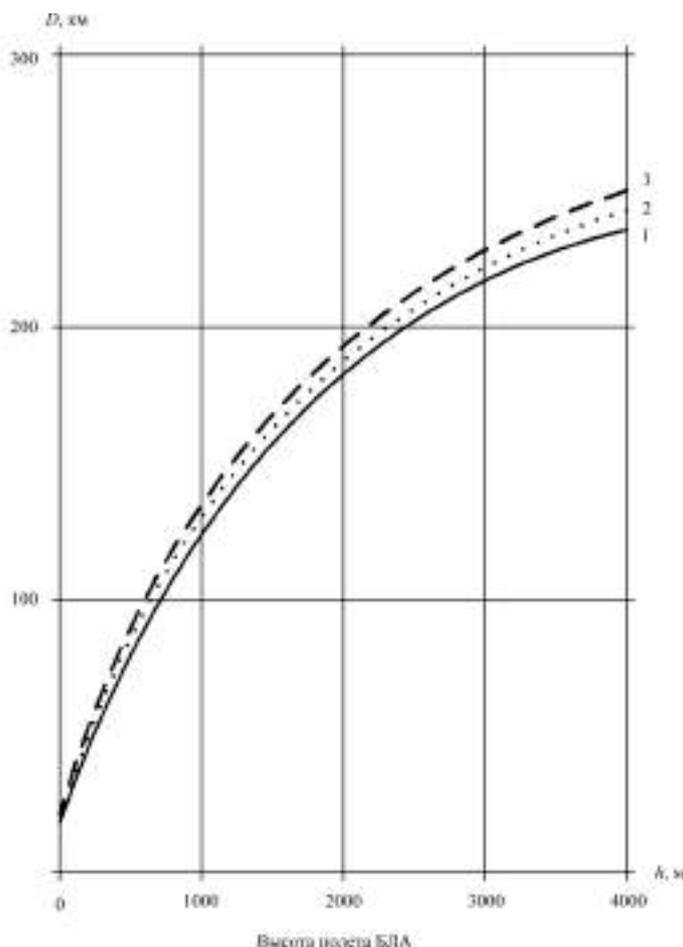


Рис. 2. Зависимости дальностей связи с БЛА от высот корабельных антенн (1 – высота подъема антенны 20 м, 2 – высота 30 м, 3 – высота 40 м)

боткой радиосигналов и предусматривать специальные помехозащищенные режимы работы в условиях действия средств РЭБ противника.

Одним из режимов обмена информацией, эффективным в условиях воздействия преднамеренных помех, как известно [9], является передача информации на основе расширения спектра сигнала посредством псевдослучайных последовательностей. С учетом перемещений БЛА в воздушном пространстве при выполнении функций ретрансляторов должны использоваться радиосигналы, устойчивые к смещению частоты (к эффекту Доплера). К таким сигналам относятся сигналы с относительной фазовой модуляцией второго порядка (ОФМ-2) [10]. Данные радиосигналы в сочетании псевдослучайными последовательностями рассматривались в [11]. Было найдено соотношение для вероятности ошибочного приема, с использованием которого произведена оценка эффективности обработки информации в условиях сигналоподобных преднамеренных помех. Это расчетное соотношение имеет вид:

$$P_{\text{ош}} \leq \left[\frac{1}{8} \left\{ \exp \left[t \left(4\sqrt{q} (q + \sqrt{q} + 1) + (q + 1)^2 \right) \right] \right\} + \frac{1}{4} \left\{ \exp \left[t (q - 1)^2 \right] \right\} + \frac{1}{8} \left\{ \exp \left[t \left(-4\sqrt{q} (q - \sqrt{q} + 1) + (q + 1)^2 \right) \right] \right\} + \frac{1}{4} \left\{ \exp \left[t (\sqrt{q} + 1)^2 (q - 1) \right] \right\} + \frac{1}{4} \left\{ \exp \left[t (\sqrt{q} - 1)^2 (q - 1) \right] \right\} \right]^n, \quad (2)$$

где q – отношение мощностей сигнала и помехи на длительности одной посылки, n – база псевдослучайного ОФМ-2 сигнала, t – параметр, по которому производится оптимизация с помощью ЭВМ.

Расчеты [11] по (2) показали, что использование псевдослучайных ОФМ-2 сигналов позволяет обеспечить уверенный прием информации в каналах связи с летательными аппаратами, в том числе с БЛА. В таких каналах учтены два негативных фактора: смещение частоты несущей вследствие эффекта Доплера и действие сигналоподобных организованных (преднамеренных) помех с энергетикой, превосходящей энергетика передаваемого радиосигнал. В качестве примера при помехе, вдвое превышающей по мощности сигнал, когда $q = P_c / P_n = 0,5$ и при базе псевдослучайного ОФМ-2 сигнала $n = 100$ по (2), найдена вероятность ошибочного приема, которая в данном случае не превысит величину $P_{\text{ош}} \leq 2,1 \cdot 10^{-2}$.

Ясно, что при современных требованиях к достоверности передаваемой информации, эта величина оказывается не вполне приемлемой. Поэтому для достижения заданных требований по достоверности следует использовать сложные псевдослучайные сигналы с большими значениями базы или применить дополнительно помехоустойчивое кодирование с учетом конкретных возможностей БЛА. Следует иметь в виду, что в противном случае в условиях преднамеренных помех, создава-

емых средствами РЭБ противника, выполнения возложенной задачи по ретрансляции сигналов посредством БЛА окажется невозможным. Таким образом, некоторое усложнение оборудования БЛА может стать дополнительной «платой» за гарантированную возможность доставки важной информации в сложных условиях ее передачи при действии средств РЭБ противника в каналах радиосвязи между кораблями соединения, выполняющими задачу в заданных районах Мирового океана.

Литература

1. Потапов, В. И. Беспилотные летательные аппараты: за и против / В.И. Потапов, А.А. Нагорский // Вестник академии военных наук. – 2011. – № 2. – С. 137–142.
2. Попов, В. А. О развитии беспилотных летательных аппаратов корабельного базирования / В.А. Попов // Авиационные системы. – 2013. – № 6. – С. 16–27.
3. Кошкин, Р. П. Беспилотная авиация – новая отрасль авиационных технологий / Р.П. Кошкин // Стратегические приоритеты. – 2016. – № 1 (9). – С. 22–43.
4. Боев, Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами / Н.М. Боев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. 2 (42). – С. 86–91.
5. Григорьев, Д. Российская армия получит уникальный беспилотник [Электронный ресурс] / Д. Григорьев // Российская газета. Специальный проект: Русское оружие. – Режим доступа <https://rg.ru/2016/12/15/rossijskaia-armiia-poluchit-unikalnyj-bespilotnik.html>, свободный. – Загл. с экрана.
6. Сычев, В. Для российских военных создадут беспилотный «тейлситер» [Электронный ресурс] / В. Сычев // Интернет-издание N+1. – Режим доступа: <http://www.aviaport.ru/digest/2016/12/14/403305.html>, свободный. – Загл. с экрана.
7. Старченков, А. В. Защищенная связь шестого поколения [Электронный ресурс] / А.В. Старченков // Национальная оборона. – 2017. – № 2. – Режим доступа: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/defense/2012/0622/21058612/detail.shtml>, свободный. – Загл. с экрана.
8. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн / М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
9. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. под ред. А.В. Назаренко. – Изд. 2-е, испр. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
10. Окунев, Ю. Б. Цифровая передача информации фазоманипулированными сигналами / Ю.Б. Окунев. – М.: Радио и связь, 1991. – 296 с.
11. Биккенин, Р. Р. Прием псевдослучайных сигналов со смещенной частотой несущей в условиях помех, похожих на сигнал / Р.Р. Биккенин, А.А. Андрюков // Информация и Космос. – 2016. – № 1. – С. 26–31.

Энергетическая скрытность сигналов ППРЧ, сформированных в базисах функций сплайн-характеров

Energy concealment of the signals of FHSS formed in the bases of spline-characters functions

Тихонов / Tikhonov S.

Сергей Сергеевич

(i.m.top.banana@gmail.com)

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»

(ВАС им. С. М. Буденного) МО РФ,

старший помощник начальника отделения отдела

г. Санкт-Петербург

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Викторович

(practicdsv@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ВАС им. С. М. Буденного,

профессор кафедры радиосвязи.

г. Санкт-Петербург

Кудрявцев / Kudryavtsev A.

Александр Михайлович

(practicdsv@yandex.ru)

доктор военных наук, профессор.

ВАС им. С. М. Буденного,

профессор кафедры радиоразведки

и радиоэлектронной борьбы.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: метод расширения спектра на основе ППРЧ – method of the spectrum spreading on the basis of FHSS; базисы функций сплайн-характеров – bases of the spline-characters functions; энергетическая скрытность сигналов – energy concealment of signals; структурная скрытность сигналов – structural concealment of signals.

На основе проведенных ранее теоретических исследований по разработке сигналов в базисах сплайн-характеров для передачи их в режиме ППРЧ рассмотрены возможности этих сигналов в части дополнительного повышения скрытности линий радиосвязи с ППРЧ. Эффект достигается за счет распределения энергии новых сигналов на гораздо большем частотно-временном пространстве при оценке их в классических гармонических базисах. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие правомерность теоретических заключений.

Based on previous theoretical studies on the development of signals in spline-characters bases for their transmission in the FHSS mode, the possibilities of these signals in the part of an additional increase in the radio communication links concealment with FHSS have been considered. The effect is achieved due to the energy distribution of new signals in a much larger frequency-time space when evaluating them in classical harmonic bases. The results of modeling have been presented, which confirm the theoretical conclusions validity.

Введение

Структурная скрытность режима с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) обусловила ему широкое применение в технике радиосвязи [1]. Причем увеличение скорости перестройки способствует повышению скрытности указанного режима, поскольку объективно снижается вероятность обнаружения сигналов в пределах каждой из его субчастот [2].

Между тем проведенные в [3, 4] исследования показали, что с ростом скорости ППРЧ снижается дальность связи, поскольку уменьшается энергия сигнала на длительности интервала существования на субчастоте.

Таким образом, перед техникой радиосвязи возникает объективное противоречие. С одной стороны необходимо обеспечить требуемую дальность передачи сообщений, которая предполагает увеличение длительности сигнального символа, а с другой – повысить скрытность работы линии радиосвязи от несанкционированного мониторинга, достигаемой повышением скорости ППРЧ.

Одним из решений данной проблемы является использованием негармонических базисов формирования сигналов [5–7] в том числе и в режиме с ППРЧ. На страницах данного журнала этот вопрос уже поднимался. Так в [8] предложено для этих целей использовать базисы функций сплайн-характеров (БФСХ), которые наделяют сигналы структурной скрытностью

по отношению к методам их обработки в гармонических базисах функций Фурье (ГБФФ), широко используемых при реализации различных средств радиомониторинга.

В настоящей статье продолжено исследование этого вопроса. В частности, предлагаются результаты оценки энергетической скрытности сигналов, сформированных в БФСХ (далее по тексту – сигналов БФСХ), используемых линиями радиосвязи, работающими в режиме с ППРЧ (далее по тексту – ЛРС с ППРЧ).

Свойство сигналов в базисах функций сплайн-характеров

В [9] обосновано, что любой сигнал $S^p(t)$ пространства периодических сплайнов дефекта 1 может быть представлен на основе B -сплайнов $M^p(t)$ порядка p и заданной степени гладкости $p-1$:

$$S^p(t) = \frac{1}{N} \sum_k q_k M^p(t-t_k), \quad (1)$$

где q_k – амплитудные значения сплайн-функций (аналог энергетических коэффициентов, определяющих спектр для ГБФФ); N – количество отсчетов сигнала.

На рис. 1 показаны примеры периодических B -сплайнов первых четырех порядков $p = 1, 2, 3, 4$.

В общем случае, многообразие дискретных форм представления сигналов существенно шире классического ГБФФ, который в настоящее время широко используется при цифровой обработке сигналов (ЦОС) [10].

Так, в пространстве всех функций $L(H, K)$, заданных на абелевой группе H и принимающих значения в некотором кольце K , аналогами комплексных экспонент являются функции-характеры $\chi(n, k)$ [11], образующие ортонормированный базис. Однако их использование ограничено в силу физической нереализуемости в средствах связи, поэтому в [12] предложено объединить сплайны и характеры в единую конструкцию. Открывающаяся при этом бесконечность выбора типов сплайн-характеров наделяет их свойством структурной скрытности.

Для подтверждения данного утверждения рассмотрим их частный случай, а именно – функции сплайн-Виленкина-Крестенсона (СВКФ), которые образуются при упорядочении пространства G_n^p по Пэли [7], которое теперь запишем как ${}_{\text{Pal}}G_n^p$. В общем случае пространство $\text{Pal}(n, k)$ представляет собой набор базисных функций $\text{Pal}(n, k) = w^{\sum_{i=1}^n n_{i+1} \rightarrow k_i}$ где $w = \frac{j2\pi}{\mu}$. Тогда характеры

$L(H, K) m_n^p(t) = \frac{1}{N} \sum_k \bar{\chi}(n, k) M^p(t \ominus_{\mu} t_k)$, в пространстве $\text{Pal}(n, k)$ можно представить как ${}_{\text{Pal}}m_n^p(t) = \frac{1}{N} \sum_k \overline{\text{Pal}}(n, k) M^p(t \ominus_{\mu} t_k)$, где $\overline{\text{Pal}}$ комплексно-сопряжено с Pal . Соответственно:

$${}_{\text{Pal}}\xi_n = {}_{\text{Pal}}F_n / {}_{\text{Pal}}u_n^p; \quad {}_{\text{Pal}}F_n(q) = \frac{1}{N} \sum_k \text{Pal}(n, k) q_k;$$

$${}_{\text{Pal}}U_n^p(t) = \frac{{}_{\text{Pal}}m_n^p(t)}{{}_{\text{Pal}}u_n^p}; \quad {}_{\text{Pal}}c_n = {}_{\text{Pal}}F_n(z);$$

$${}_{\text{Pal}}u_n^p(t) = {}_{\text{Pal}}F_n(M^p) = \frac{1}{N} \sum_k \overline{\text{Pal}}(n, k) M^p(t_k);$$

$$t_k = \left(\frac{p}{2} + k \right) / N.$$

В [9] функции ${}_{\text{Pal}}m_n^p(t)$ и ${}_{\text{Pal}}U_n^p(t)$ определены как СВКФ. Являясь частным случаем БФСХ, СВКФ обладают всеми присущими им существенными для ЦОС свойствами. Так, на рис. 2. показана область определения СВКФ, позволяющая оценить их потенциальное разнообразие.

В качестве примера, на рис. 3а,б показаны СВКФ по модулю $\mu = 4$ и порядком сплайна $p = 4$ дефекта 1 длиной $N = 16$ отсчетов, а на рис. 3в, г представлены их исходные версии дискретных функций Виленкина-Крестенсона.

Таким образом, поскольку БФСХ образуют полноценный базис, то на их основе можно формировать сигналы и для режима с ППРЧ, что и было предложено в [8]. В общем случае математическую модель сигналов в ППРЧ можно интерпретировать как

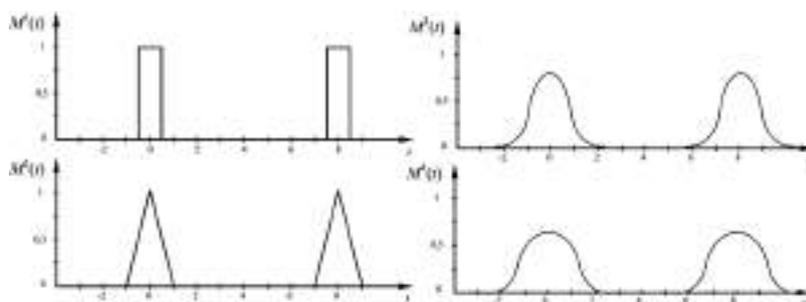


Рис. 1. Периодические B -сплайны $M^p(t)$ для $p = 1, 2, 3, 4$



Рис. 2. Область определения функций СВКФ

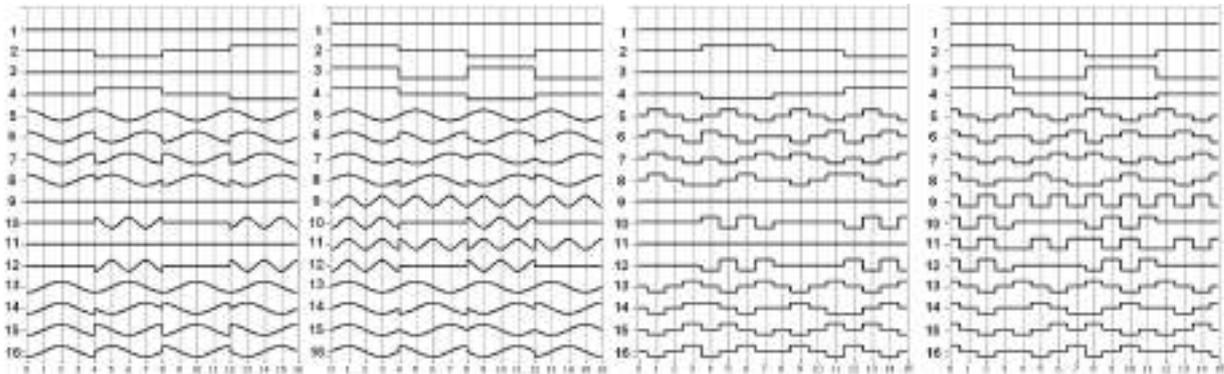


Рис. 3. Семейство СВКВ по модулю $\mu = 4$ и порядком сплайна $p = 4$ дефекта 1 длиной $N = 16$ отчетов (слева) и исходные версии функций Виленкина – Крестенсона (справа)

$$s(t) \Leftrightarrow \sum_{n=1}^N \sqrt{2P_s} \cdot \cos([f_0 + a_n \{\Delta f\}_k] \cdot n \times T_h + \varphi_n + \varphi_0), \quad (2)$$

Физическая интерпретация модели (2) следующая. Если определить, что начальная частота работы ЛРС равна f_0 , то каждому символу данных a_n , где $1 \leq n \leq N$, а N – число передаваемых символов, в соответствие можно поставить некоторое приращение частоты Δf_k , выбираемое по некоторому закону (в том числе и случайному) из базы допустимых номиналов частот [14]. Причем $1 \leq k \leq K$, где N – число допустимых частот, разрешенных (определенных) для ППРЧ. В формуле (2) $t = n \times T_h$ – текущее время, изменяемое на n -м элементе, равно времени работы ЛРС на субчастоте, т.е. T_h ; P_s – мощность сигнала; Δf – минимальное приращение по частоте между двумя любыми элементами сигналами в N -ичной последовательности; φ_n – фаза n -го символа данных.

Теперь если в модели (2) вместо мнимой и реальной части колебания, описываемых функциями $\sin(t)$ или $\cos(t)$,

использовать функции сплайн-характеров $L_{(H,K)} \lambda_n^p(t)$, то аналитическую модель сигнала ППРЧ в БФСХ, в котором для передачи данных используется K частот в n -м интервале передачи $n \times T_h < t < (n+1)T_h$, в общем случае, можно будет представить выражением:

$$s(t) = \sqrt{2P_s} \tau_{L(H,K)} \lambda_{n_0+a_i \Delta n}^p(t, \varphi_i(t)), \quad (3)$$

где $\tau_{L(H,K)} \lambda_n^p(t, \varphi_i(t))$ базисная функция из пространства $L_{(H,K)} G_n^p$ с номером n (физический смысл номера базисной функции – частота в БФСХ) и гладкостью p на длительности интервала $\tau(H, K)$; n_0 – минимальный номер базисной функции; Δn – минимальный разнос по номеру функции между сигналами в M -ичной последовательности; a_i – значение i -го символа данных, взятое из последовательности целых чисел $1, 2, \dots, M$; φ_i – фаза i -го символа.

Таким образом, замена функции синуса на базисную функцию из пространства сплайн-характеров, позво-

ляет получить модель сигнала ППРЧ, сформированного в БФСХ [8], т.е. сигнала, обладающего дополнительной структурной скрытностью на длительности каждой из его поднесущих частот.

Анализ энергетической скрытности сигналов БФСХ с ППРЧ

Отсутствие априорной информации об используемом базисе неизбежно ведет к неправильному принятию решению об идентифицируемом сигнале, поэтому энергия сигнала, сформированного в БФСХ, распределяется на гораздо большем частотно-временном пространстве. В результате спектральная плотность мощности на длительности обрабатываемой посылки снижается, что в свою очередь ведет к ухудшению условий его обнаружения.

В подтверждении указанных заключений на рис. 4 представлены фрагменты сигнала ППРЧ в ГБФФ и его локальные спектры на субчастотах. На рис. 5 показаны фрагменты сигнала в БФСХ и их локальные спектры, полученные, соответственно в собственных базисах (БФСХ) и ГБФФ.

Очевидно, что спектральное представление сигнала БФСХ в ГБФФ ведет к своеобразному «размазыванию» энергии в широком диапазоне частот. Кстати, аналогичный эффект проявляется при обработке не только сигналов в БФСХ. Так, обработка сигналов в базисах негауссовых функций также приводит к снижению локализации энергии вокруг поднесущего колебания [6, 15].

В результате спектральная плотность энергии в пределах привычного понимания субчастоты уменьшается, что ведет за собой и снижение вероятности энергетического обнаружения такого сигнала. Так, согласно [16, 17] вероятность энергетического обнаружения определяется параметром h_0 , численно равному отношению сигнал/шум (ОСШ) на выходе согласованного фильтра при заданной величине вероятности ложной тревоги $P_{лт}$.

Поскольку сигнал ППРЧ представляет собой радиоимпульс, то, соответственно, его обнаружение будет осуществляться на основе вычисления отношений условной плотности корреляционного интеграла K при отсутствии сигнала $W(K|0)$ и при его наличии $W(K|1)$ [18].

При некогерентном приеме [19], т.е. при случайной фазе и амплитуде обрабатываемого сигнала, значения $W(K|0)$ и $W(K|1)$ рассчитываются по следующим формулам [3].

$$W(K|1) = 2 \times \frac{|K|}{2\sigma_k^2 + E_s^2} \exp\left[-\frac{|K|^2}{2\sigma_k^2 + E_s^2}\right], \quad (4)$$

$$W(K|0) = \frac{|K|}{\sigma_k^2} \exp\left[-\frac{|K|^2}{2\sigma_k^2}\right]. \quad (5)$$

Соответственно, вероятность ложной тревоги

$$P_{лт} = \exp\left[-\frac{h^2}{2}\right], \quad (6)$$

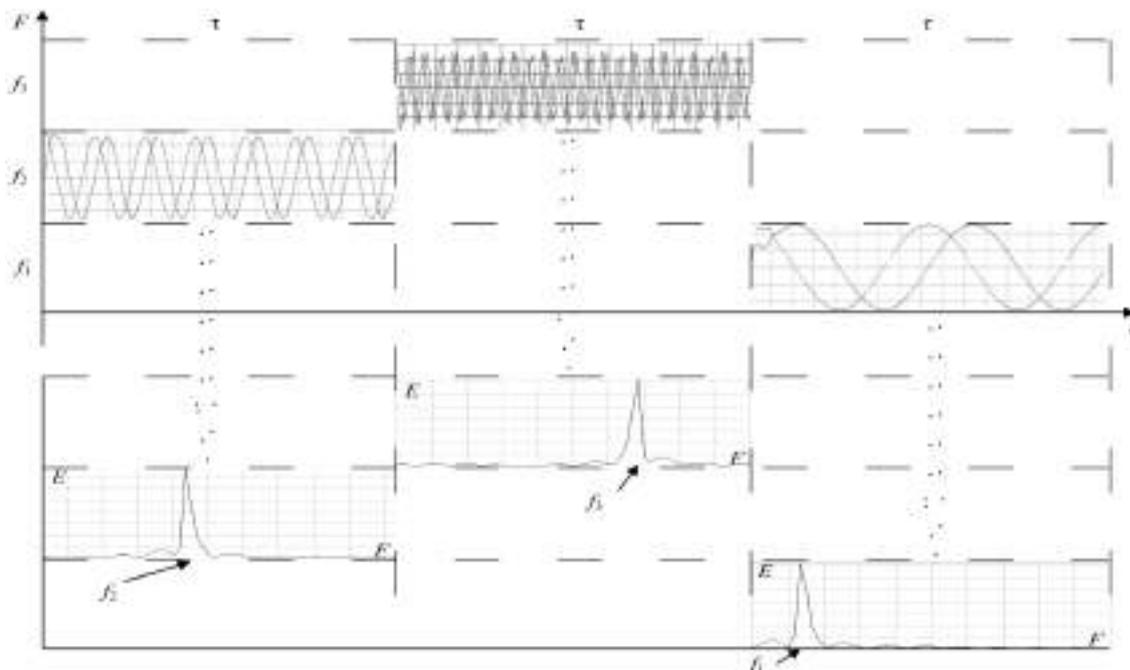


Рис. 4. Фрагменты сигнала ППРЧ в ГБФФ и его локальные спектры на субчастотах

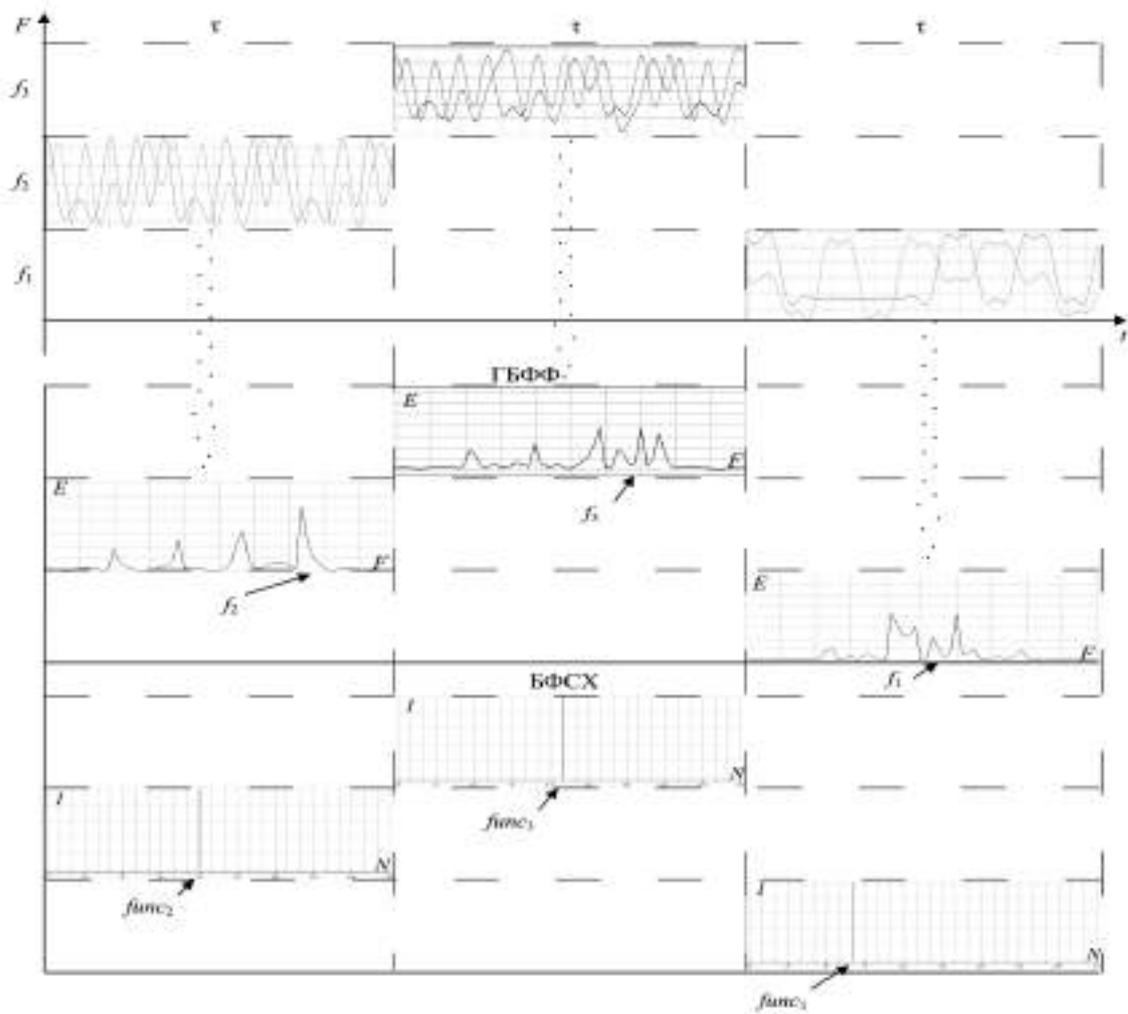


Рис. 5. Фрагменты сигнала в БФСХ и их локальные спектры, полученные, соответственно в ГБФФ и БФСХ

а вероятность правильного обнаружения

$$P_{\text{ПО}} = \exp \left[-\frac{h_0^2/2}{1+h^2/2} \right]. \quad (7)$$

Здесь $h_0 = \frac{K_0}{\sigma_k} = \sqrt{-2 \ln[(P_{\text{ЛТ}})_{\text{max}}]}$; $\sigma_k = \sqrt{\frac{N_0 E_s}{2}}$, E_s – энергия сигнала, N_0 – спектральная плотность мощности шума, K – величина корреляционного интеграла, $h_0 = \frac{K_0}{\sigma_k} = \sqrt{-2 \ln[(P_{\text{ЛТ}})_{\text{max}}]}$ – пороговое значение при обнаружении для заданной величины K_0 .

Далее, преобразуя по пороговой величине ОСШ значение вероятности правильного обнаружения, получим

$$P_{\text{ПО}} = (P_{\text{ЛТ}})^{\frac{1}{1+h^2/2}}. \quad (8)$$

Таким образом, задаваясь величиной $P_{\text{ЛТ}}$, можно построить зависимость вероятности обнаружения сигнала от ОСШ (см. рис. 6).

На рис. 5 показаны графики вероятности обнаружения $P_{\text{ПО}}$ в зависимости от ОСШ при $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$ и $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-5}$.

Анализ полученных результатов показывает, что снижение требований к вероятности ложной тревоги на два порядка обеспечивает повышение вероятности энергетического обнаружения в среднем на 10% во всем диапазоне принятия решения, в зависимости от ОСШ.

Между тем применение сигналов БФСХ при прочих равных условиях, в том числе и сохранении вероятности ложной тревоги, ведет к снижению величины $P_{\text{ПО}}$ в среднем порядка 50%, что эквивалентно ухуд-

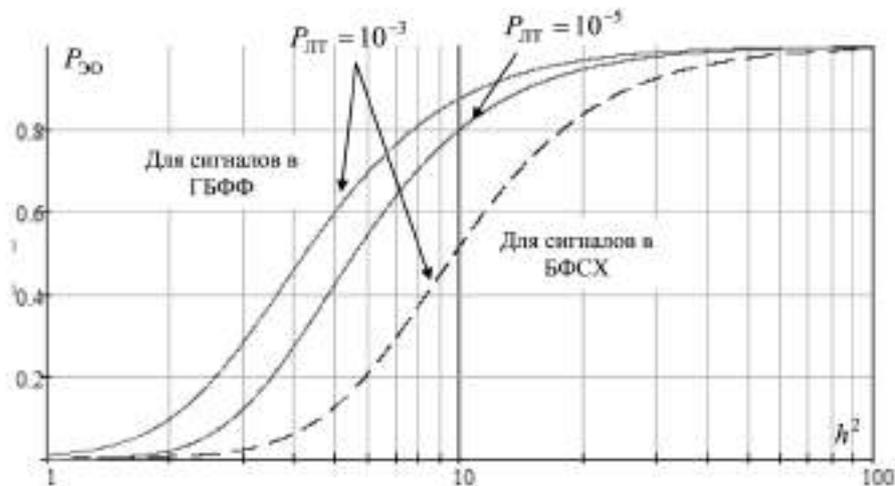


Рис. 6. Зависимость вероятности совпадения от количества сканирований частотно-временного пространства

шению ОСШ в канале обработки на 2,5 дБ или увеличению дистанции разведки не менее чем на 25% [20].

Заключение

Таким образом, полученные результаты моделирования подтверждают теоретические выводы о дополнительном повышении скрытности ЛРС с ППРЧ, при использовании сигналов БФСХ. Следовательно, использование негармонических базисов способствует повышению скрытности ЛРС при сохранении дальности связи без повышения скорости перестройки режима ППРЧ.

Дальнейшие исследования авторы связывают с анализом возможности обнаружения сигналов негармонических базисов при использовании методов, представленных в [21, 22].

Другим направлением видится исследование вопросов результата совместного частотно-временного поиска факта работы ЛРС с ППРЧ и энергетического обнаружения ее сигналов в пределах субчастот [14, 23].

Литература

- Макаренко, С. И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
- Работа линий радиосвязи с ППРЧ в условиях преднамеренных помех / М.А. Вознюк [и др.] // Информационные технологии. – 2012. – № 10. – С. 64–67.
- Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов [и др.]. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
- Дворников, С. В. Проблема поиска сигналов источников информации при радиомониторинге / С.В. Дворников // Мобильные системы. – 2007. – № 4. – С. 33–35.
- Агиевич, С. Н. Синтез радиосигналов в базисе функций сплайн-Виленкина-Крестенсона / С.Н. Агиевич, В.Л. Беспалов // Информация и Космос. – 2007. – № 3. – С. 81–90.
- Дворников, С. В. Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.М. Спиринов // Информационные технологии. – 2013. – № 12. – С. 52–55.
- Агиевич, С. Н. Структурная скрытность сигналов, сформированных в базисах сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона-функций / С.Н. Агиевич, А.А. Пономарев, С.С. Тихонов // Телекоммуникации. – 2013. – № 4. – С. 2–9.
- Тихонов, С. С. Обобщенная математическая модель сигналов с ППРЧ в базисах функций сплайн-характеров / С.С. Тихонов // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 47–51.
- Агиевич, С. Н. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Виленкина-Крестенсона / С.Н. Агиевич, С.В. Дворников, А.С. Гусельников // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 3. – С. 52–57.
- Трахтман, А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов / А.М. Трахтман. – М.: Сов. радио, 1972. – 352 с.
- Вариченко, Л. В. Абстрактные алгебраические системы и цифровая обработка сигналов / Л.В. Вариченко, В.Г. Лабунец, М.А. Раков. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 247 с.
- Агиевич, С. Н. Сплайн-Виленкина-Крестенсона функции в представлении сигналов / С.Н. Агиевич // Научное приборостроение. – 2002. – Т. 12, № 1. – С. 79–89.
- Агиевич, С. Н. Синтез функций сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона / С.Н. Агиевич, А.А. Пономарев, С.С. Тихонов // Информационно-управляющие системы. – 2011. – № 6. – С. 45–48.

14. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С.В. Дворников [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 4. – С. 11–14.

15. Дворников, С. В. Параметрическая мимикрия сигналов, модулированных колебаниями и сформированных в различных функциональных базисах / С.В. Дворников, С.С. Манаенко, С.С. Дворников // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 259–263.

16. Куликов, Е. И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов. – М.: Советское радио, 1978. – 296 с.

17. Дворников, С. В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения / С.В. Дворников // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14, № 4. – С. 92–97.

18. Дворников, С. В. Обнаружение сигналов на основе обработки спектральных компонент их функций взаимной корреляции / С.В. Дворников, А.Ю. Ровчак // Информация и Космос. – 2010. – № 4. – С. 29–33.

19. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. – 2-е изд. переработ. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.

20. Предложения по модернизации радиостанций серии Р-168МРАЕ для передачи видео / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2016. – № 4 (27). – С. 92–99.

21. Метод обнаружения радиосигналов на основе обработки их частотно-временных распределений плотности энергии / С.В. Дворников [и др.] // Информация и Космос. – 2005. – № 4. – С. 13–17.

22. Трехэтапный алгоритм принятия решения при обнаружении сигналов с различной динамикой амплитуд / С.В. Дворников [и др.] // Информация и Космос. – 2008. – № 4. – С. 14–17.

23. Кудрявцев, А. М. Концептуальная структуризация поиска как способа организации процессов радиомониторинга / А.М. Кудрявцев, С.В. Дворников // Информация и Космос. – 2008. – № 2. – С. 32–35.

Алгоритм определения защитных контуров для многоконтурных защитных структур на транспортной сети телекоммуникационной системы

Algorithm for determining protective circuits for multi-loop protective structures on the transport network of a telecommunications system

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

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

Грязев / Gryazev A.

Андрей Николаевич

(agryazev@zniis.ru)

кандидат технических наук.

ФГУП ЦНИИС,

генеральный директор.

г. Москва

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть – transport network; отказоустойчивая структура – fault-tolerant structure; многоконтурная защитная структура – circuit protective structure; защитный контур – protective circuit.

Рассматривается алгоритм определения защитных контуров для многоконтурных защитных структур транспортной сети телекоммуникационной системы, который позволяет найти структуру каждого защитного контура и рассчитать пропускные способности ребер, входящих в каждый защитный контур.

An algorithm for determining protective circuits for multi-loop protective structures of the transport network of a telecommunications system has been considered. It allows finding the structure of each protective circuit and calculating the capacity of the edges entering each protective circuit.

По мере роста объемов передаваемого трафика и развития облачных технологий скорости передачи на линиях и узлах транспортных сетей (ТС) телекоммуникационных систем (ТКС) существенно увеличиваются. Повреждения ТС ТКС приводят к огромным потерям

передаваемой информации. Поэтому с увеличением информационной нагрузки на ТС ТКС создание и совершенствование ее системы резервирования приобретает особую актуальность. Для резервирования топологических структур с высокой связностью исследуются механизмы резервирования на основе p -циклов, а также реально применяются известные варианты резервирования линейного тракта (секций мультиплексирования) или соединения подсети [1–4].

Использование большинства схем резервирования для высокосвязных топологий ТС ТКС эффективно и целесообразно в случае, когда потоковая структура сети квазиоднородна, то есть когда пропускные способности резервируемых линий передачи ТС примерно одинаковые. Однако привести потоковую структуру к квазиоднородной не всегда возможно. Следовательно, резерв пропускной способности для неравномерной потоковой структуры будет создавать избыточность, которая в свою очередь зависит от степени неоднородности потоковой структуры [4, 5].

Для снижения избыточности резервной пропускной способности линий передачи ТС ТКС было предложено модифицировать известный подход к организации системы резервирования на основе p -циклов. В этом подходе замкнутый контур с резервной пропускной способностью декомпозируется на линиях передачи

с избыточной пропускной способностью на несколько замкнутых контуров с меньшей пропускной способностью. Этот подход получил название – резервирование с использованием многоконтурных защитных структур (МЗС). Математическая модель для минимизации (снижения избыточности) пропускной способности сетевого резерва МЗС выглядит следующим образом [5]:

$$U_{\text{рез}}^{\text{МЗС}} = \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N c_{ij}^k \times u_{ij}^k \rightarrow \min, \quad (1)$$

где: K – количество защитных контуров в МЗС, u_{ij}^k – резервная пропускная способность k -ого защитного контура (k – индекс, обозначающий порядковый номер защитного контура), а

$$c_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й защитный контур} \\ & \text{проходит через ребро } b_{ij}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При моделировании и поиске МЗС необходимо рассчитать резервные пропускные способности линий передачи ТС ТКС и найти топологические структуры для МЗС с учетом пропускных способностей каждого защитного контура. Задача поиска МЗС формулируется с использованием элементов теории графов. Многосвязная потоковая структура ТС ТКС, изображенная в качестве примера на рис. 1, моделируется ненаправленным графом $G = \{A, B, U, L\}$. В этом графе множество вершин $A = \{a_i; i = \overline{1, N}\}$ соответствует множеству узлов ТС с общим числом N , а множество ребер $B = \{b_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ описывает линии передачи между этими узлами, на котором определены: матрица пропускных способно-

стей $U = \{u_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ и значения длин линий передачи $L = \{l_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$. Требуется найти некоторое множество защитных контуров $C = \{C^k; k = \overline{1, K}\}$, где K – количество контуров, в котором каждый защитный контур определяется множеством образующих его ребер $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ и множеством пропускных способностей этих ребер $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$.

Задача поиска МЗС для ТС ТКС декомпозируется на две подзадачи: подзадача определения резервных пропускных способностей для линий передачи $U_{\text{рез}} = \{u_{ij}^{\text{рез}}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ и подзадача определения структуры защитных контуров $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ с расчетом пропускных способностей каждого контура $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$.

В настоящий момент уже разработаны предложения по решению первой подзадачи [6]. Для решения второй подзадачи предлагается на существующем графе $G = \{A, B, U, L\}$, с найденными в ходе решения первой подзадачи значениями резервных пропускных способностей $U_{\text{рез}} = \{u_{ij}^{\text{рез}}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$, выполнить его декомпозицию на неориентированные циклы с учетом минимальных значений резервных пропускных способностей. Для рассмотрения порядка решения второй подзадачи предлагается использовать алгоритм определения структуры защитных контуров МЗС с расчетом их пропускных способностей (рис. 2), который состоит в следующем:

1. В матрице резервных пропускных способностей $U_{\text{рез}} = \|u_{ij}^{\text{рез}}\|$ находится элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности, то есть $U_{\text{рез}}^{\text{мин}} = \min \|u_{ij}^{\text{рез}}\|$ и $U_{\text{рез}}^{\text{макс}} = \max \|u_{ij}^{\text{рез}}\|$.
2. Между инцидентными узлами ребру $U_{\text{рез}}^{\text{мин}} = \min \|u_{ij}^{\text{рез}}\|$, найденному в предыдущем пункте, производится поиск кратчайшего пути на полной матрице $L = \|l_{ij}\|$.

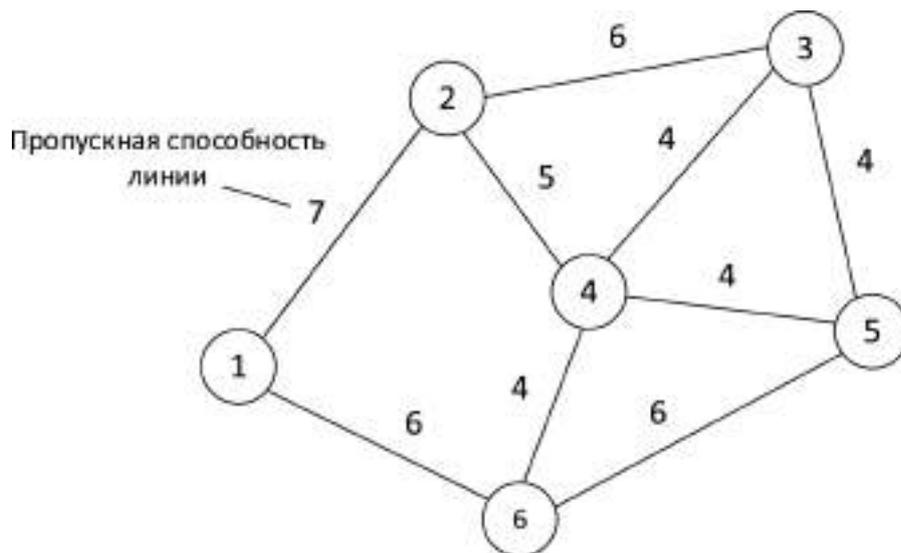


Рис. 1. Пример многосвязной потоковой структуры ТС ТКС с различными значениями пропускных способностей линий передачи

Для этого возможно использовать алгоритм Дейкстры, но с таким учетом, чтобы найденный путь включал ребро $U_{\text{рез. max}} = \max \|u_{\text{рез. } ij}^{\text{рез}}\|$. Ребра, вошедшие в кратчайший путь, и ребра с максимальным и минимальным значением резервной пропускной способности формируют защитный контур $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ с последующим определением его пропускных способностей $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$, которые будут соответствовать $U_{\text{рез. min}} = \min \|u_{\text{рез. } ij}^{\text{рез}}\|$ для каждого ребра защитного контура.

3. Из матрицы резервных пропускных способностей $U_{\text{рез}} = \|u_{\text{рез. } ij}^{\text{рез}}\|$ вычитаются значения пропускных способностей найденного контура $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$. В случае достижения нулевого значения элемента матрицы $U_{\text{рез}} = \|u_{\text{рез. } ij}^{\text{рез}}\|$ соответствующее ребро в шаге 2 не рассматривается. Процедура поиска защитных контуров (шаги 2–5) повторяется до полного обнуления матрицы резервных пропускных способностей $U_{\text{рез}} = \|u_{\text{рез. } ij}^{\text{рез}}\|$.

Результатом работы алгоритма является получение определенного множества защитных контуров $C = \{C^k; k = \overline{1, K}\}$, где каждый защитный контур определен множеством ребер его образующих $C^k = \{c_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ и пропускными способностями ребер $U^k = \{u_{ij}^k; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$, входящих в каждый контур.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма рассмотрим пример определения структуры защитных контуров с расчетом пропускной способности каждого защитного контура ТС ТКС для МЗС на многосвязной потоковой структуре, представленной на рис. 1, которая характеризуется матрицей пропускных способностей (2) и матрицей расстояний (3):

$$U = \begin{pmatrix} - & 7 & 0 & 0 & 0 & 6 \\ 7 & - & 6 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 5 & 4 & - & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & - & 6 \\ 6 & 0 & 0 & 4 & 6 & - \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$L = \begin{pmatrix} - & 35 & 0 & 0 & 0 & 35 \\ 35 & - & 40 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & - & 40 & 30 & 0 \\ 0 & 25 & 40 & - & 30 & 25 \\ 0 & 0 & 30 & 30 & - & 45 \\ 35 & 0 & 0 & 25 & 45 & - \end{pmatrix}. \quad (3)$$

При этом сделаем допущение, что значения резервных пропускных способностей $U_{\text{рез}} = \{u_{\text{рез. } ij}^{\text{рез}}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ уже найдены [6], то есть

$$U_{\text{рез}} = \begin{pmatrix} - & 7 & 0 & 0 & 0 & 7 \\ 7 & - & 6 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & - & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 4 & 2 & - & 6 \\ 7 & 0 & 0 & 1 & 6 & - \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В соответствии с предложенным алгоритмом (рис. 2) решаем второй подзадачу – определение структуры защитных контуров с расчетом пропускной способности каждого защитного контура для примера расчета:

1. В матрице резервных пропускных способностей (4) находим элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности: $U_{\text{рез. min}} = \min \|1_{\text{рез. } 24}^{\text{рез}}\|$ и $U_{\text{рез. max}} = \max \|7_{\text{рез. } 12}^{\text{рез}}\|$.

2. Находим кратчайший путь от вершины 2 к вершине 4 без учета ребра 2–4 и с учетом ребра 1–2. В результате получили защитный контур №1 для примера расчета (рис. 3) с пропускной способностью 1.

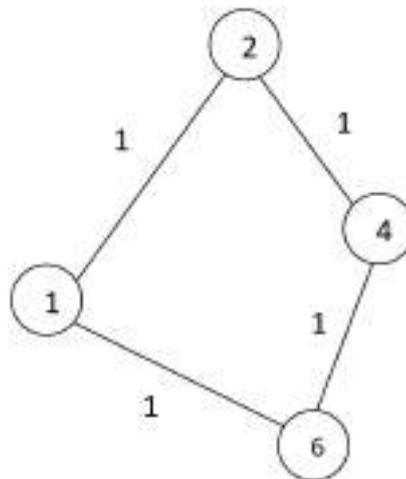


Рис. 3. Защитный контур №1 для примера расчета

3. Из матрицы резервных пропускных способностей (4) вычитаем значения пропускных способностей защитного контура №1, в результате чего полученная матрица будет иметь следующий вид:

$$U'_{\text{рез}} = \begin{pmatrix} - & 6 & 0 & 0 & 0 & 6 \\ 6 & - & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & - & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & - & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 2 & - & 6 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 6 & - \end{pmatrix}. \quad (5)$$

4. В матрице (5) находим элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности, то есть $U_{\text{рез. min}} = \min \|2_{\text{рез. } 34}^{\text{рез}}\|$ и $U_{\text{рез. max}} = \max \|6_{\text{рез. } 12}^{\text{рез}}\|$.

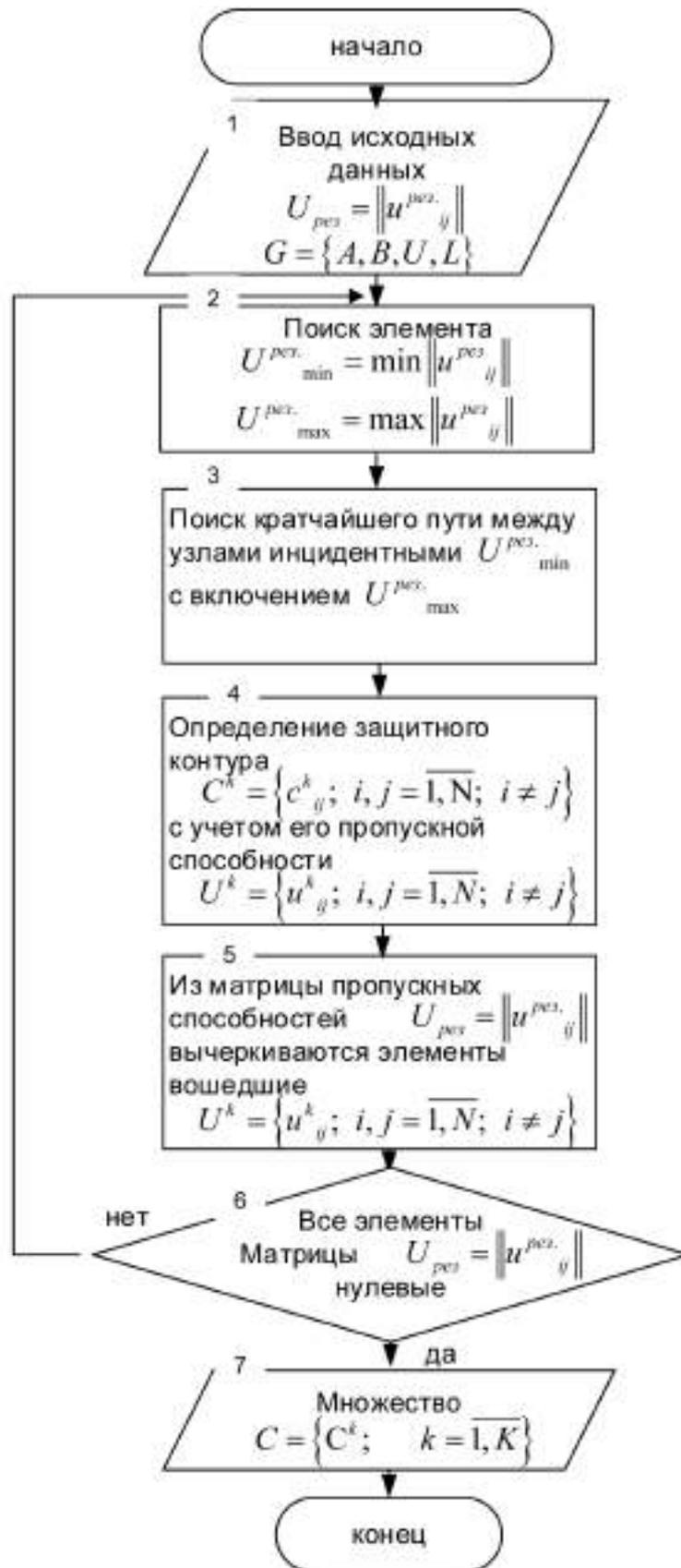


Рис. 2. Алгоритм определения структуры защитных контуров МЗС с расчетом их пропускных способностей

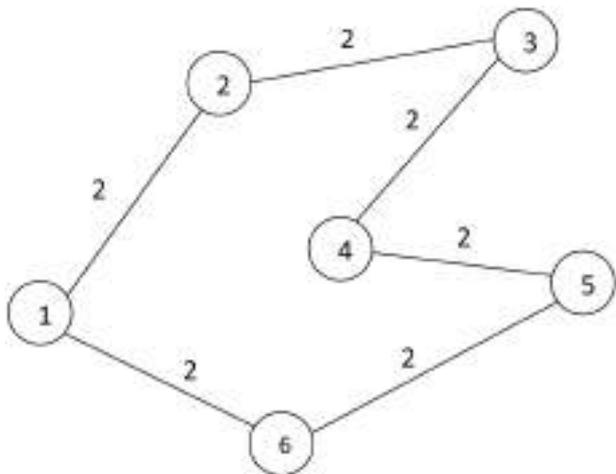


Рис. 4. Защитный контур №2 для примера расчета

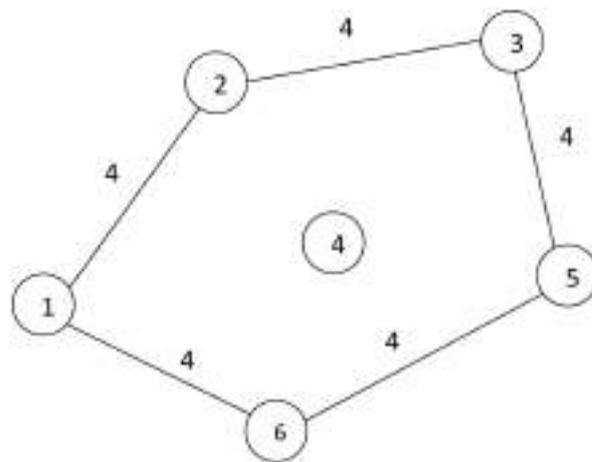


Рис. 5. Защитный контур №3 для примера расчета

5. Находим кратчайший путь от вершины 3 к вершине 4 без учета ребра 3–4 и с учетом ребра 1–2, в результате чего получим защитный контур №2 для примера расчета (рис. 4) с пропускной способностью 2.

6. Из матрицы резервных пропускных способностей (5) вычитаем значения пропускных способностей защитного контура №2. Полученная матрица будет иметь следующий вид:

$$U''_{рез} = \begin{vmatrix} - & 4 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 4 & - & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & - & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & - & 4 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 4 & - \end{vmatrix}. \quad (6)$$

7. В матрице (6) находим элемент с минимальным и максимальным значением резервной пропускной способности, то есть $U_{рез. \min}^{рез} = \min \|4_{рез}^{рез}\|$ и $U_{рез. \max}^{рез} = \max \|4_{рез}^{рез}\|$.

8. Находим кратчайший путь от вершины 1 к вершине 2 без учета ребра 1–2, в результате чего получим защитный контур №3 для примера расчета (рис. 5) с пропускной способностью 4.

9. Из матрицы резервных пропускных способностей (6) вычитаются значения пропускных способностей защитного контура №3, а полученная матрица будет нулевой. Таким образом, найдены три защитные структуры контуров №1, №2 и №3 и определены их пропускные способности – 1, 2 и 4, соответственно (рис. 6).

Таким образом, найденное решение задачи определения структуры защитных контуров с рассчитанными пропускными способностями для каждого защитного контура МЗС (рис. 6) подтверждает работоспособность разработанного алгоритма. Следовательно, предлагаемый алгоритм определения структуры защитных

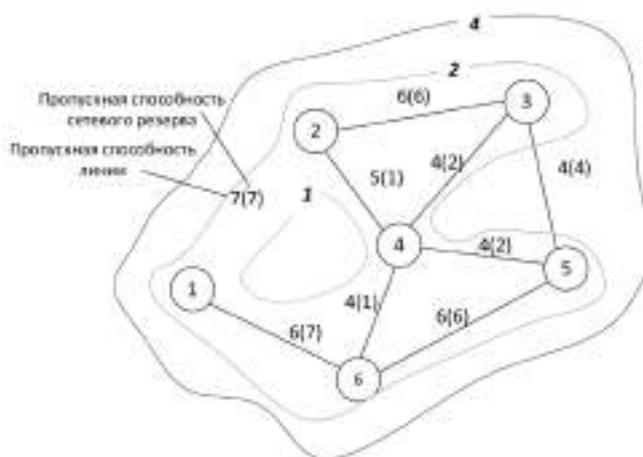


Рис. 6. Структура ТС при резервировании многоконтурной защитной структурой

контуров с расчетом их пропускных способностей целесообразно использовать при планировании сетевого резервирования МЗС для ТС ТКС.

Дальнейшие направления исследований МЗС будут направлены на моделирование работы МЗС и формулирование предложений по технической реализации МЗС на ТС ТКС. Внедрение рассмотренного механизма организации резервирования позволит существенно снизить затраты на организацию резерва и значительно повысить коэффициент использования ТС ТКС [5, 6].

Литература

1. Зюзин, А. Н. Совершенствование систем сетевого резервирования транспортной сети магистрального оператора связи / А.Н. Зюзин, И.С. Каминецкий // Электросвязь. – 2005. – № 11. – С. 18.

2. New option and insights for survivable transport networks / W.D. Grover [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2002, January. – P. 34–41.

3. 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. – 1999, January. – Vol. 7, No. 2. – P. 199–223.

4. Подход к поиску отказоустойчивой структуры транспортной сети телекоммуникационной системы на основе р-циклов / В.В. Ефимов [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 36–39.

5. 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.

6. Ефимов, В. В. Алгоритм определения резервной пропускной способности линий передачи транспортной сети телекоммуникационной системы для многоконтурных защитных структур / В.В. Ефимов, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Информация и Космос. – 2017. – № 1. – С. 29–33.

Модель многопозиционной помехозащищенной сигнальной конструкции на основе QPSK модуляции

Model of multi-position noise-proof signal structure based on QPSK modulation

Пшеничников / Pshenichikov A.

Александр Викторович

(siracooz77@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

имени Маршала Советского Союза

С. М. Буденного» МО РФ,

докторант кафедры радиосвязи.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: цифровая линия радиосвязи – digital radio communication line; сигнальная конструкция – signal construction; помехозащищенность – noise immunity; модель радиолинии – radio link model.

В статье описана разработанная модель многопозиционной помехозащищенной сигнальной конструкции. На основе методов теорий сигналов, статистической радиотехники сложные модели сигнальных конструкций представлены совокупностью простейших модуляционных форматов на основе QPSK модуляции. Для объединения модулирующих сигнальных форматов применена технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов. Разработанная сигнальная конструкция обладает свойствами ортогональности и имеет повышенное, по сравнению с известными, значение помехоустойчивости.

The article describes the developed model of multi-position noise-proof signal structure. On the basis of the method of signal theories, statistical radio engineering, complex models of signal structures are represented by a combination of the simplest modulation formats based on QPSK modulation. To combine the modulating signal formats, multiplexing technology with orthogonal frequency division multiplexing is applied. The developed signal structure has orthogonality properties and has an increased value of noise immunity compared to known ones.

Вопросы обеспечения требуемой эффективности цифровых линий радиосвязи (ЦЛРС) являются достаточно актуальными на всех этапах развития сети радиосвязи как неотъемлемого элемента объединенной автоматизированной цифровой сети связи [1]. В частности, для выполнения требований, предъявляемых к ЦЛРС, необходимо решение двух системообразующих задач: повышения их помехозащищенности и пропускной способности [1].

Анализ технических решений в области повышения помехозащищенности ЦЛРС, приведенных, например, в [2–5, 14, 17], показывает, что они основаны на принципах увеличения базы сигнала за счет использования различных технологий расширения полосы излучения. Так, в [3] с учетом ограничений, накладываемых моделями каналов, предложено использование режима программной (псевдослучайной) перестройки рабочей частоты (ППРЧ). При этом алгоритм ППРЧ предполагает, что рабочая частота изменяется в пределах выделенного для ведения радиосвязи частотного диапазона в соответствии с кодом псевдослучайной последовательности (ПСП). Таким образом, стратегия программной перестройки, обеспечивающая повышение помехозащищенности ЦЛРС, заключается в своевременном «уходе» от воздействия преднамеренных помех.

В [4] обосновано использование прямого расширения спектра сигнала методом умножения информационной битовой последовательности на ПСП. Такое преобразование приводит к уменьшению спектральной плотности мощности сигнала в единичной полосе частот, что в конечном итоге определяет повышение помехозащищенности ЦЛРС. Необходимо отметить, что алгоритмы технической реализации прямого расширения спектра предъявляют большие требования к характеристикам канала, чем режим ППРЧ, однако при этом дополнительно обеспечивается структурная скрытность сигнала.

Среди известных подходов наибольший интерес представляет технология расширения спектра за счет применения вейвлет-функций [5]. Представление радиосигнала в базисе вейвлет-функций, как и прямое расширение спектра, дополнительно увеличивает структурную скрытность сигнала, которая зависит от порядка формирующей функции Гаусса.

Вопросы повышения пропускной способности ЦЛРС отражены в работах [6–13]. В частности, в [6–9] разра-

ботаны модели помехоустойчивых многопозиционных сигналов, обеспечивающих повышение пропускной способности линий радиосвязи. В [10–11] обоснованы теоретические принципы преобразования сигналов, определяющие повышение их помехоустойчивости. В [12] предложен адаптивный метод демодуляции сигналов. В [13] предложена интегральная модель радиолинии, обеспечивающая требуемые показатели эффективности ее функционирования.

Анализ рассмотренных подходов показывает, что их объединяет применение сложных алгоритмов, базирующихся на использовании частотных ресурсов радиолинии. При этом основной целью управления является повышение развед- и помехозащищенности ЦЛРС. Однако общим недостатком представленных подходов является повышение требований к параметрам радиоканалов, что определяет некоторое усложнение трактов формирования и обработки сигналов. Поэтому сложные сигнально-кодовые конструкции (СКК), особенно многопозиционные, находят ограниченное применение в современных комплексах радиосвязи.

Кроме того, отметим сложность управления ресурсами таких радиолиний [14]. Данный факт определяет возрастание времени цикла управления и, как следствие, снижение устойчивости функционирования ЦЛРС, что приводит к уменьшению ее помехозащищенности.

С учетом выявленных противоречий целью данной работы является разработка модели многопозици-

онной помехозащищенной сигнальной конструкции, свободной от указанных недостатков. Для достижения поставленной цели воспользуемся методами теории сигналов, статистической радиотехники [15–18], согласно которых сложные модели сигналов представим совокупностью более простых модуляционных форматов.

В свою очередь, для решения данной задачи, воспользуемся принципом разбиения сложных сигналов на непересекающиеся подмножества, впервые сформулированным Унгербоеком [2]. В качестве исходной выберем СКК КАМ-16 (квадратурная амплитудная манипуляция), обобщив затем предлагаемый подход для моделей больших размерностей.

Использование принципа Унгербоека позволяет представить СКК КАМ-16 в виде четырех непересекающихся СКК QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) (см. рис. 1) или в виде восьми СКК типа BPSK (Binary Phase Shift Keying).

В качестве модуляционного формата, формирующего СКК КАМ-16, определим СКК типа QPSK. Выбор указанной сигнальной конструкции обусловлен обеспечиваемой им максимальной битовой скоростью при наилучшей помехоустойчивости [2]. В равной степени возможно использование СКК типа BPSK, однако в этом случае для сохранения битовой скорости необходимо выделение большего частотного ресурса радиолинии, что не всегда реализуемо на практике.

В целях агрегирования формирующих модуляционных форматов применим технологию мультиплексирования с ортогональным частотным разделе-

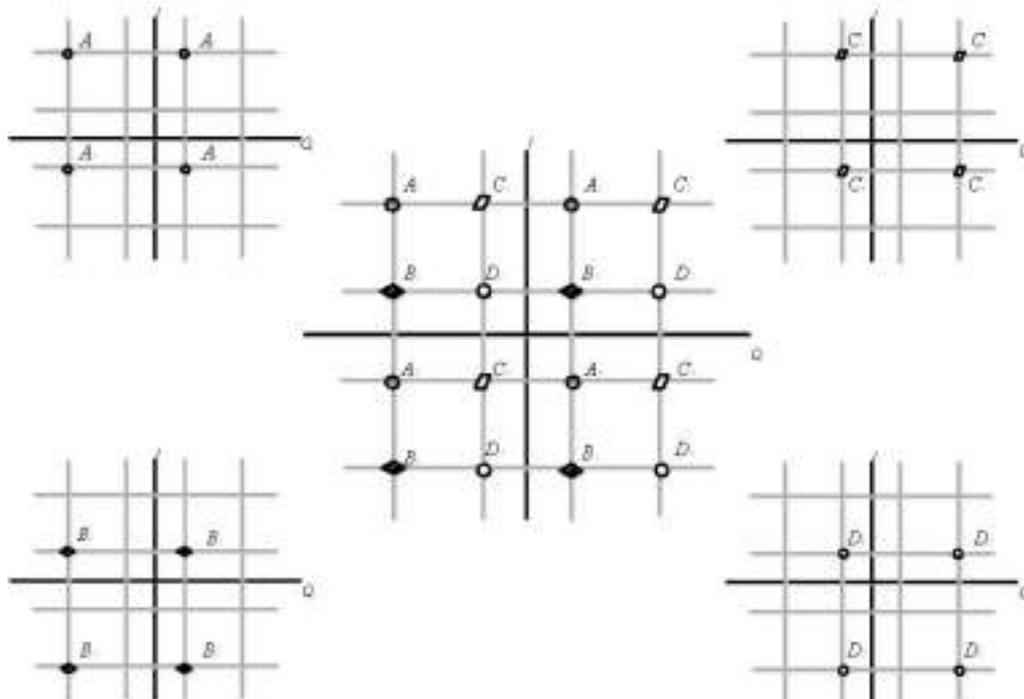


Рис. 1. Представление СКК КАМ-16 на основе четырех СКК типа QPSK

нием каналов OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). В этом случае сигналы, обрабатываемые на приемной стороне на каждой из поднесущих частот, являются независимыми.

Для формирования СКК КАМ-16 с использованием принципа ортогонального разбиения Унгербоэка [2] необходимо выделить четырех частот, параметры которых определяются форматом OFDM (см. рис.1). Между тем, анализ исходной битовой последовательности (ИБП), модулирующей СКК КАМ-16, показывает, что для сокращения задействованного частотного ресурса достаточно использовать только две СКК типа QPSK, если передавать первую СКК QPSK, промодулированную первой парой элементов ИБП на первой частоте OFDM, а вторую – на второй. Отметим, что применение технологии OFDM восстанавливает свойство ортогональности формируемой СКК КАМ-16 при ее формировании предложенным способом.

При условии независимости событий ошибочного приема элементов сигнала на частотах OFDM и статистической однородности частот вероятность символьной ошибки такой модели КАМ-16 может быть вычислена как вероятность полной группы событий по следующей формуле

$$P_{\text{ош КАМ-16}} = P_{\text{ош QPSK}} (2 - P_{\text{ош QPSK}}). \quad (1)$$

Разработанный подход к формированию моделей многопозиционных сигналов применим к СКК любой размерности. Действительно, при добавлении еще одной СКК QPSK и частоты OFDM получим СКК КАМ-64. При этом

$$P_{\text{ош КАМ-64}} = P_{\text{ош QPSK}} (P_{\text{ош QPSK}}^2 - 3P_{\text{ош QPSK}} + 3). \quad (2)$$

Таким образом, разработана модель многопозиционной помехозащищенной сигнальной конструкции на основе QPSK модуляции. При этом в отличие от известных разработанные решения предполагают простой алгоритм их технической реализации, в том числе при увеличении позиционности СКК.

Для оценки эффективности разработанной модели в системе Simulink проведено моделирование формирования и приема в канале с аддитивным белым гауссовым шумом СКК QPSK*2 и СКК КАМ-16. На рис. 2 получены зависимости вероятностей битовой ($P_{\text{ош б}}$) и символьной ($P_{\text{ош с}}$) ошибок приема от отношения энергии сигнала к энергии шума (ОСШ) h_0 , в дБ.

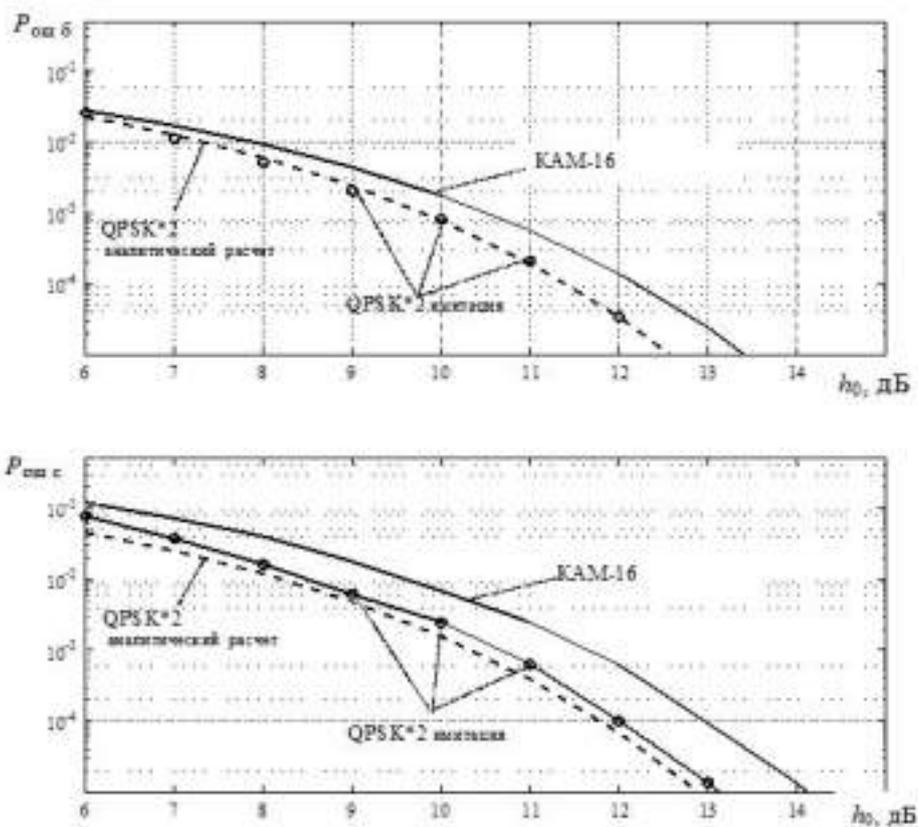


Рис. 2. Помехоустойчивость многопозиционных СКК

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Формирование СКК квадратурных сигналов прямым методом требует больших энергетических ресурсов радиолинии, чем применение разработанной модели. Так, вероятность битовой ошибки 10^{-5} при формировании СКК КАМ-16 достигается при 13,5 дБ (см. рис. 2), в то время как для формирования СКК QPSK*2 потребуется 12,5 дБ. Следует отметить, что применение разработанной модели подразумевает увеличение частотной базы формируемого сигнала: для СКК КАМ-16 – в два раза. Таким образом, обобщенный энергетический выигрыш, рассчитанный по показателю отношения энергетического выигрыша к увеличению частотной базы, составляет для СКК QPSK*2 (КАМ-16) – 0,55 дБ/Гц.

2. Уменьшение позиционности M многомерных СКК до позиционности формирующей СКК QPSK в разработанной модели определяет увеличение длительности передаваемого бита в $\frac{k_{\text{мск}}}{2}$ раз, где $k_{\text{мск}}$ – последовательность одновременно передаваемых бит в известной M -позиционной сигнальной конструкции. Отметим, что при этом значение энергии бита (E_b) информационной битовой последовательности остается неизменным, так как увеличение длительности бита при использовании СКК QPSK компенсируется равным делением энергетических ресурсов на частотные составляющие OFDM. Так, при формировании шестнадцати позиционной СКК разработанным методом увеличение длительности символа в 2 раза по сравнению с СКК КАМ-16 компенсируется делением энергии на две частотные ортогональные составляющие. Поэтому с этих позиций помехоустойчивость разработанной модели СКК не изменяется.

Вместе с тем увеличение длительности бита в разработанной модели СКК определяет уменьшение полосы частот, в пределах которой передается основная часть энергии сигнала, по сравнению с известными моделями. Данный факт, в свою очередь, приводит к уменьшению энергии шума, что и определяет получаемый выигрыш по помехоустойчивости разработанной модели сигнальной конструкции.

3. Разработанная модель помехозащищенного многопозиционного сигнала наиболее рационально использует частотный ресурс радиолинии, чем метод декомпозиции по Уренгбоеку. Так, при формировании СКК КАМ-16 задействовано только две СКК QPSK и две частоты OFDM, вместо четырех СКК QPSK.

4. Прием разработанной модели СКК подразумевает одновременную обработку нескольких частотных каналов, что несколько повышает структурную сложность комплексов радиосвязи. Поэтому для ее технической реализации предлагается использование SDR (Software-Defined Radio) технологий. При этом фактически тракт обработки представляет собой демодулятор сигналов QPSK модуляции при приеме сигналов

большой позиционности.

5. Разработанная модель предполагает увеличение базы сигнала при увеличении его помехоустойчивости, что позволяет характеризовать разработанную многопозиционную сигнальную конструкцию как помехозащищенную. Кроме того, использование одного модуляционного формата в виде СКК QPSK способствует повышению скрытности формируемой сигнальной конструкции.

6. Способ формирования многопозиционных сигналов с использованием СКК QPSK обладает большими потенциальными возможностями. Так, дальнейшее повышение эффективности его применения может быть основано на разработке методов управления частотным ресурсом ЦЛРС в зависимости от условий сигнальной и помеховой обстановки.

Для оценки адекватности полученных решений проведены аналитические расчеты полученных имитационным моделированием значений вероятностей символьной и битовой ошибки СКК. Расчеты имитационного моделирования с достаточной точностью совпадают с аналитическими расчетами (см. рис. 2).

Следует отметить, что разработанная модель не претендует на новизну технического решения. Похожее решение агрегирования технологий OFDM и СКК QPSK реализовано, например, в стандарте 4G LTE для увеличения информационной скорости передачи информации.

Однако разработанная модель, в отличие от известных, позволяет формировать многопозиционные СКК с минимально необходимым расширением базы при увеличении их помехоустойчивости. Данное обстоятельство, в свою очередь, определяет возможность применения таких СКК в помехозащищенных ЦЛРС, функционирующих в сложных условиях сигнальной и помеховой обстановки. Кроме того, разработанная модель упрощает алгоритмы реализации многомерных СКК в ЦЛРС.

Таким образом, разработанная модель помехозащищенного многопозиционного сигнала значительно расширяет область применения многомерных СКК в радиолиниях при различном воздействии на их ресурсы. Направление дальнейших исследований авторы связывают с повышением эффективности разработанных решений за счет локализации спектра формируемого сигнала.

Литература

1. Лихачев, А. М. Концептуальные основы создания и развития автоматизированной системы управления ОАЦСС ВС РФ / А.М. Лихачев, А.В. Абрамович, А.С. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2016. – № 2. – С. 6–21.
2. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. под ред. А.В. Назаренко. – Изд. 2-е, испр. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расши-

рением спектра сигнала методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / Под ред. В.И. Борисова. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.

4. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / Под ред. В.И. Борисова. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.

5. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов / С.В. Дворников [и др.] // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 140–143.

6. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2014. – № 2. – С. 51–56.

7. Дворников, С. В. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, Д.А. Бурькин // Информация и Космос. – 2015. – № 2. – С. 4–7.

8. Дворников, С. В. Помехоустойчивая модель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, С.С. Манаенко // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21, № 9. – С. 685–689.

9. Дворников, С. В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой / С.В. Дворников, С.С. Манаенко, А.В. Пшеничников // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12, № 2. – С. 87–93.

10. Методика трансформации сигнального созвездия КАМ-16 с изменением его формы / А.Ю. Гужва [и др.] // Электросвязь. – 2015. – № 2. – С. 28–31.

11. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов / С.В. Дворников [и др.] // Информация и Космос. – 2015. – № 3. – С. 13–16.

12. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2013. – № 2. – С. 90–97.

13. Пшеничников, А. В. Интегральная модель радиолинии в конфликтной ситуации / А.В. Пшеничников // Информация и Космос. – 2016. – № 4. – С. 39–45.

14. Рунеев, А. Ю. Организация космической связи. Методология и математические модели оценки эффективности / А.Ю. Рунеев. – СПб: ВАС, 1992. – 98 с.

15. Величкин, А. И. Теория дискретной передачи непрерывных сообщений / А.И. Величкин. – М.: Сов. радио, 1970. – 296 с.

16. Френкс, Л. Теория сигналов / Л. Френкс ; пер. с англ. под ред. Д.Е. Вакмана. – М.: Сов. радио, 1974. – 344 с.

17. Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. пособие / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

18. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

Обзор методов, применяемых при проектировании защищенных систем связи геоинформационных систем

Overview of methods used in the design of secure communication systems of geoinformation systems

Карманов / Karmanov A.

Андрей Геннадьевич
(karmanov.nip@gmail.com)

кандидат технических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО), доцент кафедры ГИС.

г. Санкт-Петербург

Чжао Лэй

(zl_2321@hotmail.com)

Университет ИТМО,
аспирант кафедры ГИС.

г. Санкт-Петербург

Бондаренко / Bondarenko I.

Игорь Борисович
(igorlitmo@rambler.ru)

кандидат технических наук.

Университет ИТМО,
доцент кафедры ГИС.

г. Санкт-Петербург

Иванова / Ivanova E.

Евгения Анатольевна
(karmanov.nip@gmail.com)

Университет ИТМО,
аспирант кафедры ГИС.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: геоинформационная система – geoinformation system; живучесть – survivability; экспертные системы – expert systems; искусственные нейронные сети – artificial neural networks; ранжирование – ranging; нейроны – neurons; оптимизация – optimization; протоколы – protocols; радиосеть – radio network.

В работе рассмотрен набор методов, использованных для проектирования систем связи с наземными подвижными объектами при построении геоинформационных систем. Представленная методология опирается на методы экспертных оценок, оптимизации, аппарат искусственных нейронных сетей, математическую статистику. Позволяет производить оценку применимости компонентов беспроводных сетей для разработки защищенных систем связи на основе анализа параметров живучести.

The article considers a set of methods used to design communication systems with terrestrial mobile objects in the construction of geoinformation systems. The presented methodology is based on methods of expert evaluations, optimization, the device of artificial neural networks, mathematical statistics. Allows evaluating the applicability of wireless network components for the development of secure communication systems based on the analysis of survivability parameters.

Введение

Геоинформационные системы (ГИС) представляют собой бурно развивающееся направление, имеющее военное, промышленное и гражданское применение. Средствами ГИС решаются задачи картографирования, кадастра, мониторинга экологии и чрезвычайных событий, геомаркетинга и т.п. [1, 2].

ГИС – программно-технические комплексы, включающие в себя: технические средства обработки данных, средства обмена данными в ЛВС с выходом в разнотипные сети, а также резервированные средства хранения данных и осуществляющие взаимодействие с внешними организациями по коммутируемым и выделенным каналам связи. Анализ структуры ГИС и типа системы управления базами данных позволяют отнести такие системы к распределенным. Развитие беспроводных протоколов связи позволило получить доступ к ресурсам ГИС практически из любой точки планеты.

Большое число разнородных пользователей ГИС, таких как государственные и ведомственные организации, коммерческие предприятия, частные лица, – диктует необходимость обеспечения защиты конфиденциальной информации, содержащей сведения, составляющие государственную, служебную и коммерческую тайну, а также персональные данные пользователей

[3]. Еще одной проблемой при защите данных в ГИС является их большой объем, что затрудняет использование методов защиты, требующих значительных временных затрат.

Для устойчивого функционирования ГИС при влиянии негативных воздействий разработчикам необходимо решать ряд задач, таких как: выявление узких мест каналов, узлов при перегрузке, обеспечение безопасного обмена между источниками и приемниками информации и т.д.

Ведущие производители оборудования активно ведут исследования и разработки в области мобильных систем связи с целью повышения пропускной способности и скорости передачи цифровых данных. Несмотря на то что в беспроводных сетях используются встраиваемые протоколы безопасности, которые включают в себя шифрование и аутентификацию пользователя, системам связи, особенно на этапе их разработки, необходимо уделять повышенное внимание. В связи с этим тематика статьи является актуальной.

Предложенные методы при организации защиты систем радиосвязи

Для построения и развертывания ГИС может использоваться широкая номенклатура сетевых протоколов, поддерживающих сети подвижной связи сухопутные, морские, авиационные, спутниковые и общего пользования. Проанализировав беспроводные стандарты связи, используемые в настоящее время для передачи данных, сделан вывод о том, что организации, особенно службы по обеспечению безопасности, испытывают дефицит радиочастотных каналов для развертывания систем связи. Каналов становится еще меньше из-за продажи прав использования некоторых диапазонов частот коммерческим операторам связи. Это влечет к сужению полосы частот (F_c):

$$F_c = nF_n,$$

где n – количество выделенных каналов с шириной полосы F_n у каждого.

Основными параметрами средств связи, определяющими их разделение на различные классы профессионального использования, являются:

- плотность абонентов в обслуживаемой зоне;
- площадь покрытия, которая определяет масштаб системы;
- уровень сервиса;
- автоматический или ручной выбор канала;
- возможности и глубина группообразования;
- наличие индивидуальных и аварийных вызовов;
- идентификация абонентов;
- выход в телефонную сеть, полный дуплекс на уровне абонентского терминала;
- передача коротких сообщений;
- передача данных и др.

Далее были проанализированы угрозы системе радиосвязи для ГИС. Основными угрозами системе радиосвязи являются следующие.

1. Внешняя помеха, источником которой может быть как внешняя среда (неумышленная), так и аппаратура злоумышленника (злонамеренная).

2. Перехват (прослушивание) информации с целью дальнейшей расшифровки. Удобство и легкость развертывания беспроводной сети оборачивается мобильностью не только пользователей, но и злоумышленника, местоположение которого определить достаточно сложно.

3. Искажение информации с целью препятствия приему пакета, искусственного сбоя.

4. DDoS-атака с целью перегрузки канала и/или аппаратуры радиостанций. Такие атаки очень эффективны и трудно поддаются анализу.

5. Подмена информации.

6. Клонирование SIM-карт, аппаратуры.

Злоумышленником могут реализовываться одновременно несколько из перечисленных. Например, если уровень злонамеренно генерированной помехи превосходит допустимый уровень, при котором приемо-передающей аппаратуре невозможно выделить полезный сигнал, возникает глушение. Глушение мобильной станции абонента производится с целью ее подмены аппаратом злоумышленника, или чтобы не дать клиенту реализовать соединение с базовой станцией (БС). Может осуществляться постановкой помех или направленными DoS-атаками. Глушение БС опять же может осуществляться для лишения пользователя услуг связи или для подмены БС пользователя базовой станцией злоумышленника.

Доступность аппаратуры для беспроводной связи делает возможным организацию ложной точки доступа с имитацией работы с фирменными сетевыми ресурсами.

Наиболее действенными способами защиты является контроль системы связи, резервирование, шифрование, аутентификация и идентификация пользователей и операторов, надежные схемы управления доступом пользователей к ресурсам сети.

При построении беспроводных сетей различных стандартов возможны следующие источники возникновения уязвимостей: среда передачи данных, технические параметры стандартов беспроводных сетей, системы аутентификации, криптографические методы и алгоритмы, программное и аппаратное обеспечения, человеческий фактор.

Модель оценки живучести ГИС от параметров системы включает следующие компоненты: топология сети G , множество целей C и условия функционирования ГИС U , надежность P , а также множество решаемых задач Z . Общий показатель живучести системы Q имеет интегральный и комплексный характер зависимости от живучести входящих подсистем Q_i :

$$Q = F(Q_1, Q_2, \dots, Q_k), \quad Q_i = f(G_i, C_i, U_i, Z_i, P_i) \quad (1)$$

Запас структурной живучести системы будет определяться ее избыточностью и обеспечиваться резервированием элементов. Надежность системы – сложный функционал, включающий как надежность входящих в ГИС элементов, так и структуру подсистем:

$$\mathbf{P}_{\text{сист}} = f(P_i, G_i), \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

С увеличением сложности ГИС растет сложность моделей (1) и (2) и уменьшается уровень негативных воздействий, достаточный для перехода ГИС в худшее состояние.

Параметры математических моделей, характеризующих живучесть ГИС, были получены с помощью метода экспертных оценок [4, 5]. То есть определены параметры протоколов беспроводной связи, которые сильнее всего влияют на их защищенность.

Вес j -го фактора w_j определим по выражению:

$$w_j = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^k x_{ji}}{\sum_{j=1}^n x_{ji}}, \quad (3)$$

где n – число параметров; k – количество экспертов.

Коэффициент конкордации (при наличии связанных рангов в ответах экспертов) определим по соотношению:

$$W = \frac{12S}{k^2(n^3 - n) - k \sum_{i=1}^k H_i}, \quad (4)$$

где

$$H_i = \sum_{p=1}^{Z_i} (h_p^3 - h_p), \quad (5)$$

H_i – показатель связанных рангов для i -й ранжировки; Z_i – число групп равных рангов в i -й ранжировки; h_p – число равных рангов в p -й группе связанных рангов при ранжировке i -м экспертом; величина S рассчитана по соотношению:

$$S = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^k x_{ji} - 0,5k(n+1) \right)^2. \quad (6)$$

Коэффициент конкордации W , рассчитанный по соотношениям (4–6), изменяется в диапазоне [0, 1]. Его максимум означает, что все эксперты сошлись во мнении при расстановке рангов, а минимум – что оценки экспертов рассогласованы.

Для определения показателей живучести системы радиосвязи был использован аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), описанный, например, в источниках [6, 7]. Сложность использования аппарата ИНС

на практике представляет: подбор структуры сети нейронов и ее обучение.

Путем последовательного приближения к оптимальному варианту сети было определено количество слоев, число нейронов во внутренних и внешних слоях в многослойном персептроне, метод оптимизации ошибки сети при ее обучении с помощью процедуры обратного распространения ошибки. Конец обучения ИНС наступает при условии:

$$\varepsilon_{\text{онт}} = \min \left[\frac{1}{2N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (OUT_i - E_i)^2 \right] \quad (7)$$

В соотношении (7): N_s – количество обучающих пар; OUT_i – полученное с помощью сети значение выходного нейрона при i -м наборе обучения; E_i – требуемое значение выходного нейрона при i -м наборе обучения.

Полная ошибка ИНС из выражения (7):

$$\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{W}, \mathbf{K}, \mathbf{L}_t, \dots) = \frac{1}{2N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \Delta_i^2, \quad (8)$$

где $\mathbf{W}, \mathbf{K}, \mathbf{L}_t, \dots$ – множества весов входного, выходного и скрытых слоев (t – количество скрытых слоев) соответственно, Δ_i – ошибка i -го выхода сети. Функция (8) является неотрицательной, а из условия (7) при $\varepsilon = 0$ она имеет глобальный экстремум: в этом случае сеть не допускает ошибок. Выбор метода оптимизации ошибки осуществлялся из следующего набора: метод наискорейшего (градиентного) спуска, метод параллельных касательных, сопряженных градиентов, BFGS и DFP.

Результаты экспериментов и выводы

По соотношениям (3–6) был рассчитан коэффициент конкордации $W = 0,403$ по результатам опроса экспертов. Полученное значение означает согласованность экспертов. В результате были определены значимые параметры: общее количество каналов, используемая полоса частот, мощность БС, разность каналов, наличие идентификации абонента, типичный радиус ячейки, зависимость от ландшафта, ограничение по доступу, область применения связи, наличие шифрования и оплата за использование. Остальные показатели не учитывались при дальнейшем анализе. Далее было сформировано обучающее множество для ИНС, на выход которой подавалось значение времени живучести протокола связи, взятое из открытых источников информации. С помощью программного средства NeuroPro и имитационных экспериментов была определена структура сети и ее параметры. Сеть имеет структуру 11 нейронов на входе, 8 нейронов в скрытом слое и 1 – выходной. Наилучшими методами оптимизации ошибки стали: сопряженных градиентов и BFGS. При значении точности $\pm 2\%$ понадобилось 524

цикла обучения ИНС до 100%; максимальная ошибка 1,65. Обученная таким образом сеть была использована для нахождения прогнозного значения времени живучести системы связи на основе технологии *NFC* (Near Field Communication – высокочастотной связи малого радиуса действия). Полученный прогноз составил 23,5 года. Предложенная методология позволяет также проводить анализ структурной живучести беспроводной сети связи для ГИС, но данное описание выходит за рамки объема данной статьи.

Литература

1. Защита данных геоинформационных систем / Л.К. Бабенко [и др.]. – М.: Гелиос АРВ, 2010. – 587 с.
2. Завгородний, В. И. Комплексная защита информации в компьютерных системах: Учебное пособие / В.И. Завгородний – М.: Логос; ПБОЮЛ Н.А. Егоров, 2001. – 264 с.
3. Малик, А. А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации / А.А. Малик. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 282 с.
4. Рыбина, Г. В. Особенности современных подходов к построению экспертных систем / Г.В. Рыбина // Труды конгресса «Искусственный интеллект в XXI веке». Научное издание. – М.: Изд. Физ.-мат. Лит., 2001. – С. 383–390.
5. Галушкин, А.И. Теория нейронных сетей / А.И. Галушкин. – М.: ИСПЖР, 2000. – 325 с.
6. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.
7. Прикладной статистический анализ данных. Теория. Компьютерная обработка. Области применения : Учебно-практическое пособие для вузов : [В 2-х книгах] / С.В. Алексахин [и др.] – М.: Приор, 1998. – 224 с.

Информатика, вычислительная техника и управление

(05.13.00*)

- Системный анализ, управление и обработка информации (05.13.01*)
- Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (05.13.05*)
- Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (05.13.11*)
- Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети (05.13.15*)
- Теоретические основы информатики (05.13.17*)
- Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (05.13.18*)
- Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (05.13.19*)
- Квантовые методы обработки информации (05.13.20*)

раздел

Основные показатели качества функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами

The main indicators of the quality of the functioning of information subsystems of automated control systems for complex organizational and technical objects

Легков / Legkov K.

Константин Евгеньевич

(constl@mail.ru)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

начальник кафедры.

г. Санкт-Петербург

Емельянов / Yemelyanov A.

Александр Владимирович

(slash1@inbox.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

адъюнкт.

г. Санкт-Петербург

Буренин / Burenin A.

Андрей Николаевич

(constl@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

профессор кафедры.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: автоматизированная система управления – automated control system; информационная подсистема – information subsystem; сложный организационно-технический объект – complex organizational and technical object; показатели качества функционирования – performance indicators; информационные услуги – information services; экспертный опрос – expert survey; функция полезности – utility function.

Для обеспечения требуемых показателей оперативности и непрерывности управления сложными организационно-техническими объектами в рамках автоматизированной системы управления (АСУ) ими создается развитая информационная подсистема, которая обеспечивает должностным лицам органов управления и комплексам средств автоматизации АСУ получение необходимых информационных услуг. В данной статье уделяется основное внимание вопросам выбора и обоснования показателей качества функционирования информационной подсистемы АСУ сложными организационно-техническими объектами.

To ensure the required performance and continuity of management of complex organizational and technical objects within the automated control system (ACS), they create a developed information subsystem that provides officials of management bodies and automation systems with automated information systems to obtain the necessary information services. This article focuses on the selection and substantiation of the performance indicators of the information subsystem of the ACS with complex organizational and technical objects.

При решении задач управления информационными подсистемами (ИП) автоматизированных систем управления (АСУ) сложными организационно-техническими объектами (ОТО) важным этапом является этап выбора показателей качества функционирования ИП и критериев эффективности управления ИП, т. к. именно они будут определять, каково будет управление и как оно будет организовано [1].

При выборе показателей качества функционирования и критериев управления ИП АСУ ОТО, определяющих эффективность процессов управления, будем считать, что управление достаточно эффективно, если оно обеспечивает заданный прирост показателей качества функционирования самой ИП или обеспечивает значение этих показателей не ниже требуемых в различных условиях оперативной обстановки. Таким образом возможно рассматривать показатели качества функционирования самой ИП АСУ ОТО, обеспечение требуемых значений которых в сложных условиях обстановки будет задачей управления.

Проблемы оценивания качества функционирования ИП АСУ ОТО требуют решения как при создании их систем управления, так и при их эксплуатации.

В зависимости от цели, оценивание качества функционирования ИП АСУ ОТО можно производить по различным правилам [1]. При этом множество аргументов, от которых зависит процесс функционирования ИП, назовем параметрами ИП АСУ ОТО.

ИП АСУ ОТО предназначена для решения вполне определенного круга задач. При этом, как она справля-

ется с решением этих задач, позволяют судить значения определенных характеристик качества, под каждой из которых будем понимать некоторую численную характеристику, зависящую от процесса функционирования ИП и определяющую одну из сторон качества этого процесса.

Учитывая воздействие на ИП АСУ ОТО различных случайных факторов, рассмотрим характеристики качества с вероятностных позиций. Пусть ИП АСУ ОТО имеет счетное множество состояний S_{IS} и пусть задано отображение этого множества само в себя. Тогда процесс функционирования ИП АСУ ОТО может быть задан графом $G_{IS}(S_{IS}, \Gamma)$, вершинами которого являются возможные состояния, а дугами и петлями – возможные переходы из одного состояния ИП в другое под действием комплекса причин.

Множеству состояний S_{IS} ИП ставится в соответствие множество вероятностей $P = \{P_i\}$, каждый элемент которого, есть вероятность нахождения ИП АСУ ОТО P_i в определенном состоянии [1].

Для ИП АСУ ОТО существует отображение множества причин во множество параметров L_{IS} , а это означает, что существует отображение множества L_{IS} во множество $P = \{P_i\}$. Элементы его являются функциями параметров, определяющих конкретные стороны процесса функционирования ИП АСУ ОТО, и могут служить характеристиками качества ее функционирования.

Количественно качество функционирования ИП АСУ ОТО оценивается с помощью показателей качества, в роли которых могут выступать ее характеристики (существенные свойства ИП).

Выбор показателей качества является первым вопросом постановки задачи исследования ИП АСУ ОТО в плане ее функционального предназначения. Второй вопрос состоит в формулировании самой задачи исследования. При этом цель исследования ИП заключается в установлении степени влияния различных параметров из множества L_{IS} на этот показатель.

Полное решение сформулированной задачи предполагает наличие математического описания процесса функционирования ИП АСУ ОТО. Полнота его зависит от того, сколько и каких параметров включено в множество L_{IS} , а результатом реализации математического описания должны явиться численные значения характеристик (показателей) качества. При этом влияние параметров L_{IS} на качество функционирования ИП АСУ ОТО можно оценивать по убыванию или приращению значений показателей качества [1]. Поэтому и здесь основным вопросом является выбор и обоснование показателей качества.

Обычно для ИП АСУ ОТО основными показателями качества ее функционирования являются показатели, характеризующие ее способность устойчиво выполнять задачи по предоставлению ИУ требуемой номенклатуры и требуемого качества, несмотря на комплекс воздействий нарушителей (противника) и различных случайных факторов и возмущений.

Вместе с тем обоснованный выбор показателей качества функционирования любой сложной системы и ИП АСУ ОТО в т.ч., в настоящее время является достаточно сложной задачей, правильное решение которой возможно на базе системного подхода [1, 2] и процедур экспертного оценивания [3], поскольку ИП как сложная система характеризуется множеством показателей, каждый из которых в той или иной мере определяет ее функционирование.

Итак, свойства ИП, которые позволяют достаточно полно оценить качество процессов ее функционирования и являются наиболее важными для её оценки с точки зрения всей АСУ, в интересах которой функционирует ИП, будем считать существенными свойствами ИП АСУ ОТО. Для такой сложной системы, которой является рассматриваемая ИП, единственно возможным методом выделения таких свойств, позволяющим до минимума снизить субъективизм, является метод экспертных оценок [3], а сформированные свойства ИП АСУ ОТО (рис. 1) являются основой для составления анкет и проведения процедур экспертной оценки.

Проведение экспертного опроса включает следующие этапы [3]:

- разработка анкетных вопросов, по которым желательно получить мнение экспертов;
- составление списка экспертов, включающего по возможности такое их число различной специализации, чтобы можно было быть более или менее уверенным в том, что эксперты могут в совокупности дать заключение по всему множеству вопросов;
- опрос экспертов;
- математическая обработка результатов опроса.

При формировании группы экспертов основными являются вопросы определения ее качественного и количественного состава. Работа по отбору экспертов начинается с определения круга научных и технических вопросов, которые связаны с решением задачи выбора существенных свойств ИП АСУ ОТО.

Затем определяется список специалистов, компетентных в этих областях, который служит основой при отборе кандидатов в эксперты и производится оценка потенциальных экспертов. Для чего используют ряд способов: самооценка, взаимооценка, оценка эксперта рабочей группой, статистическая оценка, тестовая оценка, документальная и комбинированная оценка.

На практике для достаточно широкого спектра ОТО рекомендуется применять метод самооценки, при котором эксперт (обычно это ДЛ ОУ ОТО) сам оценивает свою профессиональную компетентность [1, 3], т.к. опыт применения моделей экспертного оценивания и экспериментальных доказательств в системах специального назначения при осознании экспертом большой ответственности за проведенную оценку, показывает, что самооценка достаточно часто близка к объективной, а достоверность усредненной экспертной оценки тем выше, чем выше среднее значение самооценки членов

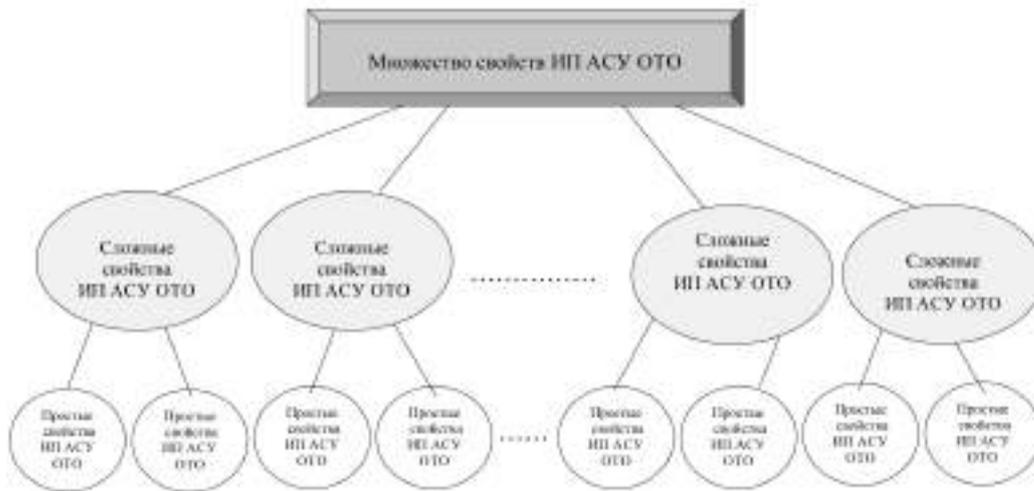


Рис.1. Существенные свойства ИП АСУ ОТО

группы.

Для оценки информированности эксперта о рассматриваемой проблеме ему предлагается анкета, в которой отмечаются источники информации и степень знакомства с объектом прогнозирования.

По данным заполненных анкет рассчитывается количественное значение степени информированности эксперта по проблеме и формируется группа кандидатов в эксперты. Далее из сформированной группы кандидатов в эксперты отбирается оптимальная по численности группа. Для этой цели разработан ряд формализованных подходов к этому вопросу, например задать целесообразное число экспертов N_{exp} , чтобы выполнялась заданная погрешность с заданной доверительной вероятностью и погрешностью по формуле:

$$N_{exp} = \frac{\tau_r^2}{\varepsilon^2} \tag{1}$$

где ε – задаваемая до начала опроса предельно допустимая относительная погрешность;

τ_r – табличное значение критерия Стьюдента для заданной доверительной вероятности.

Ограниченные возможности по подбору требуемого количества экспертов приводят к ситуации, когда многие значения N_{exp} будут явно не востребованы, т.к. по рассматриваемой задаче обоснования номенклатуры показателей качества функционирования ИП АСУ ОТО количество квалифицированных специалистов, которые потенциально могут быть экспертами, ограничено. Поэтому с увеличением численности экспертной группы в нее поневоле будут включаться эксперты все более низкой квалификации, что в конечном итоге приводит к снижению точности итоговых оценок. Обычно ограничиваются числом экспертов в 10–15 специалистов, что обеспечивает значение $\varepsilon \approx 0,5$ и $P \approx 0,94 - 0,95$.

Сформированной группе экспертов предлагается

анкета с целью оценки значимости существенных свойств ИП АСУ ОТО. Кроме того, для анализа обоснованности ответов каждому эксперту предлагается отметить источники аргументации, послужившие основанием для ответа и оценки.

Заполненная экспертами таблица характеризует степень влияния факторов или их совокупности на принимаемое решение. Эти оценки переводятся в количественную форму с помощью таблицы весовых коэффициентов, а при обработке материалов экспертного оценивания учитывают степень согласованности мнений экспертов на основе применения коэффициента конкордации:

$$K_{kk} = \frac{12d}{m^2(n^3 - n)}, \tag{2}$$

где $d = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m r_{ij} - 0,5m(n+1) \right]^2$ – отклонение сум-

мы рангов по i -му свойству от среднего арифметического сумм рангов по n свойствам ИП АСУ ОТО;

$j = 1, \dots, m$ – номер эксперта;

m – количество экспертов;

$i = 1, \dots, n$ – условный номер существенного свойства ИП АСУ ОТО;

n – количество рассматриваемых свойств;

r_{ij} – место, которое заняло i -е свойство в ранжировке j -м экспертом.

Коэффициент конкордации K_{kk} (его значение находится в пределах $0 \leq K_{kk} \leq 1$) позволяет оценить, насколько согласованы между собой ряды предпочтительности, построенные каждым экспертом. Значение $K_{kk} = 0$ означает полную противоположность, а $K_{kk} = 1$ – полное совпадение мнений экспертов. Обычно достаточно, чтобы $K_{kk} = 0,7 - 0,8$, что обеспечит требуемую достоверность.

Более низкое значение коэффициента конкордации свидетельствует о слабой согласованности мнений

экспертов. Обычно это является следствием целого ряда причин. В рассматриваемой совокупности экспертов действительно отсутствует общность мнений; внутри рассматриваемой совокупности экспертов существуют группы с высокой согласованностью мнений, однако обобщенные мнения таких групп противоположны.

Сформированное таким образом множество существенных свойств ИП АСУ ОТО $C_{sv}^{IS} = \{C_i\}$, позволит проводить оценку её качества в разных условиях.

Эвристическая процедура описания множества свойств ИП АСУ ОТО представляет собой первый этап процедур экспертного оценивания качественных показателей ее функционирования. Далее необходимо переходить к следующему этапу – определению свойств, проявление которых в наибольшей степени оказывает влияние на выполнение ИП своих задач в прогнозируемых условиях обстановки. Обычно результаты опроса экспертов представляются в виде таблицы, в которой обозначены выбранные существенные свойства ИП АСУ ОТО и ранг их значимости по степени влияния на качество функционирования ИП.

Ранг каждого свойства определяется его номером, если на его месте в ряду отсутствуют какие-либо другие. Если на одном месте находится несколько свойств, то ранг каждого из них приравнивается среднеарифметическому значению.

Чем ниже ранг, тем более важным является соответствующее свойство ИП АСУ ОТО. Таким образом, в результате проведения процедуры экспертного оценивания определяется мера значимости каждого из свойств ИП АСУ ОТО.

В соответствии с проведенным экспертным оцениванием выявлены следующие показатели (существенные свойства ИП): имеющийся ресурс средств и сервисов Re_{sv} , требуемая номенклатура услуг для обеспечения каждого информационного направления $Ne = \{Ne_{kl}\}$, требуемая номенклатура информационных услуг N_{iu} , своевременность предоставляемой сервисной информации $T_{sei} \leq T_{sei}^{sp}$, верность предоставляемой сервисной информации V_{sei} , полнота предоставляемой сервисной информации Π_{sei} , адекватность предоставляемой сервисной информации A_{sei} , уровень потребных ресурсов для предоставления требуемой сервисной информации $Re_{sei} = \{Re_{sei}(i)\}$ и т.д. При этом возможны два подхода.

Первый состоит в выделении из всей совокупности показателей основного показателя, на основе которого затем возможно построение критерия результативности функционирования ИП АСУ ОТО. Однако при этом не учитываются другие показатели, и следует на них наложить определенные ограничения.

Второй предполагает использование процедур формирования многих критериев и решение задач средствами многокритериального выбора или формирование интегрального показателя качества функционирования и использование его для построения интегрального критерия. Вместе с тем для реальных ИП АСУ ОТО, характеризующихся чрезвычайной сложно-

стью организации и функционирования, второй подход достаточно сложно реализовать на практике, поэтому чаще применяют первый подход.

В большинстве практических случаев целесообразно использовать вероятностно-временные показатели качества функционирования (вероятность своевременности предоставления услуги, среднее время предоставления требуемой услуги) [1], налагая ограничения на другие показатели – имеющийся ресурс связи $Re_{sv} \leq Re_{ogr}$, требуемую номенклатуру информационных услуг для каждого информационного направления $Ne_{min} = \{Ne_{kl}(gr)\}$, требуемую номенклатуру информационных услуг $N_{iu} \geq N_{iu}(gr)$, своевременность предоставляемой сервисной информации $T_{sei} \leq T_{sei}^{sp}$, верность предоставляемой сервисной информации $V_{sei} \geq V_{sei}(gr)$, полноту предоставляемой сервисной информации $\Pi_{sei} \geq \Pi_{sei}(gr)$, адекватность предоставляемой сервисной информации $A_{sei} \geq A_{sei}(gr)$, уровень потребных ресурсов для предоставления требуемой сервисной информации $Re_{sei}^m = \{Re_{sei}(i) \leq r_{esei}(i)\}$ экспертами могут быть сформированы дополнительные (резервные) существенные свойства, которые могут быть использованы впоследствии.

Таким образом, в результате экспертного оценивания номенклатуры существенных свойств в качестве основных параметров процессов функционирования ИП АСУ ОТО целесообразно рассматривать случайное $t_s(i)$ или среднее $t_s^*(i)$ время предоставления услуги i -го типа [1].

Так как основной целью функционирования ИП АСУ ОТО является предоставление ДЛ органов управления ОТО и КС АСУ ОТО в каждом цикле управления ОТО длительностью T необходимого комплекса из N типов ИУ с требуемым качеством Q , то при выполнении этой цели качество функционирования ИП должно обеспечиваться с вероятностью не меньшей требуемой P_T , несмотря на целый ряд воздействий на нее [1]:

$$P_{sp}(T, Q, N) = P\{t_s(1) \leq t_1, \dots, t_s(i) \leq t_i, \dots, t_s(N_s) \leq t_{N_s}\} \geq P_T. \quad (3)$$

Выполнение этого неравенства зависит от многих условий. В частности это влияние оперативной обстановки и степень организации самой ИП АСУ ОТО. Ясно, что величину P_T необходимо задать разной для различных условий обстановки.

При втором подходе, с точки зрения системного подхода, ИП АСУ ОТО должен представлять собой сложный распределенный программно-аппаратный комплекс, основу которого составляет:

- множество комплексов средств АСУ ОТО $A_{CS} = \{a_{CS}^i\}; i = 1, \dots, n_{CS};$
- множество АРМ ДЛ органов управления $A_{AWS} = \{a_{AWS}^k\}; k = 1, \dots, n_{AWS};$
- множество компонент ИП АСУ ОТО $A_{IS} = \{a_{IS}^c\}; c = 1, \dots, n_{IS};$

– множество информационных сервисов $A_{serv} = \{a_{serv}^x\}; x = 1, \dots, n_{serv}$, к которым можно обратиться и получить соответствующие расчетные, информационные, справочные, офисные или иные требуемые при управлении ОТО услуги.

Будем считать, что показатели качества функционирования ИП АСУ ОТО, характеризующие ее полезность для АСУ ОТО, должны быть связаны с характеристиками процессов предоставления требуемых сервисов, и для оценивания функционирования ИП требуется ввести комплексный показатель качества ее функционирования – некоторую функцию полезности, которая может иметь следующий вид:

$$Q_{IS} = Q\{\Pi_{TIS}, \Pi_{n_{uz}^{om}}, K_{GIS}, K_{inf}, \Pi_{ad}\}, \quad (4)$$

а соответствующий ей критерий:

$$Q_{IS} \geq Q_{kp}. \quad (5)$$

где Q_{kp} – минимально допустимый уровень качества функционирования ИП;

Π_{TIS} – множество показателей, характеризующих своевременность предоставления информационных услуг;

$\Pi_{n_{uz}^{om}}$ – множество показателей, характеризующих полноту предоставляемых информационных услуг;

K_{GIS} – коэффициент комплексной готовности;

K_{inf} – коэффициент информационной готовности;

Π_{ad} – множество показателей адекватности.

Функция полезности Q_{IS} должна зависеть от показателей Π_{TIS} , характеризующих своевременность предоставления ИУ для каждого конкретного типа услуг, определяемых временем ожидания $T_{ож}(\theta)$ или $T_{ож}(\theta')$ и временем его исполнения (собственно временем обслуживания) $T_{ис}(\theta)$ ($T_{ис}(\theta')$), являющимися случайными величинами, зависящими от нагрузки (интенсивностей потока) требований на предоставление соответствующего сервиса $\lambda_c(\theta)$ ($\lambda_c(\theta')$), от производительности соответствующего сервера информационной службы ИП – величины $B_{serv}(\theta)$ ($B_{serv}(\theta')$), характеризующего время обслуживания $T_{ис}(\theta)$ ($T_{ис}(\theta')$) и интенсивность обработки $\mu_{ис}(\theta)$ ($\mu_{ис}(\theta')$).

В качестве показателя своевременности, т.е. вида функции $T_{ис}(\theta)$ ($T_{ис}(\theta')$), можно использовать функции математического ожидания, т.е. для оценивания показателя своевременности при этом используют среднее время предоставление услуги, соотношенное к допустимому значению времени предоставления сервиса обработки, т.е.:

$$\bar{T}_{ис}(\theta) = \frac{M[T_{ис}(\theta)]}{T_d(\theta)} \quad \text{или} \quad \bar{T}_{ис}(\theta') = \frac{M[T_{ис}(\theta')]}{T_d(\theta')}. \quad (6)$$

В отдельных случаях в качестве показателя своевременности можно использовать вероятность своевременного предоставления сервиса, хотя процедуры оценивания при этом усложняются, т.е.:

$$P_{c1}(\theta) = P(T_{ис}(\theta) \leq T_d(\theta)). \quad (7)$$

$$P_{c2}(\theta) = P\{M[T_{ис}(\theta)] \leq T_d(\theta)\}. \quad (8)$$

$$P_{c1}(\theta') = P(T_{ис}(\theta') \leq T_d(\theta')). \quad (9)$$

$$P_{c2}(\theta') = P\{M[T_{ис}(\theta')] \leq T_d(\theta')\}. \quad (10)$$

Функция полезности Q_{IS} должна также зависеть от показателей полноты предоставляемых информационных услуг Π_{TIS} , характеризующих число предоставляемых процедур n_{uz} и поддерживаемых их сервисов и их долю по отношению к общему необходимому числу N_{uz}^{TP} .

В качестве такого показателя целесообразно взять величину относительного числа предоставляемых ИУ, показывающую степень охвата комплекса задач управления контуром ИП АСУ ОТО, т.е. $\frac{n_{uz}}{N_{uz}^{TP}}$. В некоторых случаях можно будет учесть важность тех или иных предоставляемых услуг.

Функция полезности Q_{IS} должна также зависеть от показателей устойчивости, т.к. ИП АСУ ОТО как система характеризуется конечной надежностью, живучестью, помехоустойчивостью, определяемых ее свойство – устойчивость ИП. В качестве показателя устойчивости можно использовать коэффициент комплексной готовности K_{GIS} , определяемый средним временем исправной работы, учитывающим выход из строя, выведение из строя нарушителем (противником) элементов подсистемы, воздействие различных помех, и средним временем восстановления, также учитывающим восстановление ИП после всех воздействий $K_{GIS} = T_{IS}^0 / T_{IS}^0 + T_{IS}^B$.

Функция полезности Q_{IS} должна также зависеть от показателей безопасности, задаваемых коэффициентом информационной готовности K_{inf} , имеющий тот же смысл, что и коэффициент комплексной готовности, но при информационных воздействиях $K_{inf} = T_{IS}^{0Inf} / T_{IS}^{0Inf} + T_{IS}^{BInf}$.

Функция полезности Q_{IS} должна также зависеть от показателей адекватности (обоснованности), учитывающих как степень адекватности применяемых в ИП АСУ ОТО способов и моделей реальным процессам функционирования ОТО, так и степень обоснованности их применения для решения тех или иных задач информационной поддержки процессов АСУ.

В целом в качестве Q_{IS} требуется взять некоторую безразмерную относительную величину $0 < q_{IS} \leq 1$, связанную со временем предоставления ИУ, т.е. с временными показателями, вероятностными показателями, вероятностно-временными показателями или показателями производительности, которые для ИП, вообще-то связаны друг с другом, т.к. в значительной степени характеризуют своевременность предоставления услуг обработки.

Поэтому целесообразно выбрать в качестве базового показателя показатель своевременности и соотнести значения других показателей с базовым, применяя меха-

Таблица 1

Результаты экспертного опроса важности свойств ИП АСУ ОТО

		Эксперты													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Свойства ИП АСУ ОТО	P_1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1
	P_2	2	1	3	1	2	3	2	3	3	2	1	2	2	3
	P_3	3	3	3	3	2	1	5	4	4	5	3	3	3	3
	P_4	2	4	2	2	3	3	3	2	2	3	3	2	2	2
	P_5	5	5	5	4	5	4	4	5	5	4	5	5	5	4
	P_6	4	4	4	3	3	4	4	4	3	2	5	4	4	5
	P_7	3	3	2	4	4	5	3	3	4	4	4	4	5	4

Таблица 2

Весовые коэффициенты свойств ИП АСУ ОТО

№ п/п	Своевременность	Устойчивость	Безопасность	Полнота	Адекватность
1	0,33	0,266	0,2	0,106	0,1
2	0,318	0,35	0,206	0,106	0,076
3	0,33	0,283	0,283	0,087	0,07
4	0,317	0,317	0,216	0,104	0,066
5	0,326	0,277	0,277	0,096	0,096
6	0,296	0,261	0,326	0,131	0,085
7	0,363	0,328	0,212	0,094	0,064
8	0,323	0,216	0,216	0,104	0,1
9	0,326	0,229	0,196	0,126	0,076
10	0,359	0,248	0,211	0,185	0,044
11	0,296	0,326	0,245	0,145	0,08
12	0,318	0,278	0,278	0,138	0,106
13	0,33	0,266	0,266	0,166	0,066
14	0,326	0,277	0,277	0,106	0,064
Оценка b_i	0,32	0,27	0,22	0,12	0,07

низмы корректировки базового показателя в соответствии со значением других показателей, влияющих на Q_{IS} , т.е. с показателями $\Pi_{n_{uz}^{om}}$, K_{serv} , K_{inf} и Π_{ad} . При этом для получения интегрального показателя качества (функция полезности) ИП необходимо также использовать методы экспертного оценивания:

$$Q_{IS}^i = Q^{lim} \{ \Pi_{TIS}, \Pi_{n_{uz}^{om}}, \Pi_{n_{uz}^{om}}, K_{inf}, \Pi_{ad} \} = b_1 \Pi_{TIS} + b_2 \Pi_{n_{uz}^{om}} + b_3 \Pi_{n_{uz}^{om}} + b_4 K_{inf} + b_5 \Pi_{ad} . \quad (11)$$

Так, пусть P_1 – существенное свойство ИП, определяющее своевременность предоставления ИУ, P_2 – существенное свойство ИП, определяющее устойчивость, P_3 – существенное свойство ИП, определяющее безопасность, P_4 – существенное свойство ИП, определяющее полноту, P_5 – существенное свойство ИП, определяющее адекватность. Пусть также P_6 и P_7 – существенные свойства ИП, определяющие другие параметры ИП АСУ ОТО, не входящие в список основных, но названные экспертами и включенные как резервные. Их показатели равномерно пересчитываются в пять основных. Результаты экспертного опроса сведены в табл. 1.

В соответствии с данными опроса и правилами, изложенными ранее, рассчитываются весовые коэффициенты существенных свойств, задающих их важность в плане качества функционирования. Данные сводятся в табл. 2.

Таким образом, основываясь на данных, приведенных в табл. 2, может быть задан общий вид функции полезности рассмотренного варианта организации процессов предоставления ИУ:

$$Q_{IS}^{var} = 0,32 \Pi_{TIS} + 0,27 \Pi_{n_{uz}^{om}} + 0,22 \Pi_{n_{uz}^{om}} + 0,12 K_{inf} + 0,07 \Pi_{ad} \quad (12)$$

Для рассмотренного варианта интегральным показателем качества функционирования ИП АСУ ОТО будет величина, определяемая в соответствии с (12), а критерием функционирования ИП с требуемым качеством будет:

$$Q_{IS}^{var} \geq Q_{kp}^{var} . \quad (13)$$

Оцениваемые значения Q_{kp}^{var} , характерные для большинства ОТО, полученные также с использованием методов экспертных оценок, обычно задают в пределах $Q_{kp}^{var} = 0,7 - 0,9$, в зависимости от сложившейся оперативной обстановки.

Таким образом, в статье представлены материалы, позволяющие исследователям методически правильно обосновать, выбрать и сформировать совокупность основных показателей качества функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления достаточно широким кругом сложных организационно-технических объектов.

Литература

1. Буренин, А. Н. Современные инфокоммуникационные системы и сети. Основы построения и управления / А.Н. Буренин, К.Е. Легков. – М.: Изд-во Медиа Паблишер, 2015. – 348 с.
2. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений / пер. под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.
3. Бешелев, С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гуревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.

Вычислительные модели взаимодействия автономных мобильных агентов транспортного комплекса горных предприятий

Autonomous mobile agents interaction computing models for mining and transportation facility

Темкин / Temkin I.

Игорь Олегович

(igortemkin@yandex.ru)

доктор технических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), заведующий кафедрой АСУ.

г. Москва

Дерябин / Deryabin S.

Сергей Андреевич

(serjioderyabin@gmail.com)

НИТУ «МИСиС»,

заведующий лабораторией кафедры АСУ.

г. Москва

Куляница / Kulyanitsa A.

Андрей Леонидович

(kulyanitsa@gmail.com)

доктор технических наук,

старший научный сотрудник.

НИТУ «МИСиС», профессор кафедры АСУ.

г. Москва

Ключевые слова: вычислительная модель – computational model; автономный роботизированный объект – autonomous robotic object; автономный агент – autonomous agent; горнотранспортный комплекс – mining and transportation complex; интеллектуальное управление – intellectual management; имитационное моделирование – simulation modeling; проблемно-ориентированная база данных – problem-oriented database; мультиагентная система – multiagent system.

В данной работе рассматривается один из аспектов разработки интеллектуальной системы управления горнотранспортным комплексом. Показано, что с функциональной точки зрения такая система может быть построена на основе трехуровневой архитектуры, учитывающей особенности работы автономных агентов и включающей «вычислительный слой». Кратко рассмотрена структура большого информационного массива данных (в том числе навигационных), который постоянно пополняется и обновляется в процессе транспортирования горной массы. Подробно обсуждаются различные с функциональной точки зрения вычислительные модели идентификации и прогноза, необходимые для организации взаимодействия автономных агентов. Также предлагаются варианты схем построения этих моделей и способов формализации. Приводятся сведения о некоторых результатах моделирования.

This article considers one of the aspects of developing an intellectual management system for mining and logistics facility. It is shown that, from the functional point of view, such a system can be built on the basis of a three-level architecture that takes into account the features of the operation of autonomous agents and includes the "computational layer". The structure of a large array of data (including navigation data) is briefly reviewed, which is constantly updated in the process of rock mass transportation. The various computational models of identification and forecast, which are necessary for organizing the interaction of autonomous agents, have been discussed in detail from the functional point of view. In addition, variants of schemes for constructing these models and methods of formalization have been offered. Some modeling results have been presented.

Хорошо известно, что добыча полезных ископаемых представляет собой сложный комплекс технологических процессов. На территории РФ в настоящее время большая часть минерального сырья добывается открытым способом. Разработки этих месторождений, как правило, ведутся в труднодоступных регионах с недостаточно развитой социальной инфраструктурой, что существенно осложняет участие человека в техно-

логических процессах и создает проблемы поиска высококвалифицированного персонала, кроме того, сами производственные процессы реализуются с каждым годом на все больших глубинах, что напрямую сказывается на рентабельности и безопасности ведения горных работ.

В этой ситуации особую значимость приобретает развитие моделей управления и методов автомати-

зации, разработка и внедрение современных интеллектуальных средств и программных систем и создание на их основе новых технологий извлечения полезного ископаемого, в рамках которых горная техника, входящая в состав горнотранспортного комплекса, частично или полностью работает без водителей и операторов [2].

Сегодня создание безлюдных технологий освоения месторождений является мировым промышленным трендом. Важнейшим элементом этой технологии является процесс транспортировки горной массы с использованием роботизированной или полностью автономной карьерной техники. Многие ведущие компании, такие как Komatsu (Япония), Caterpillar (США), Euclid-Hitachi (Япония), производящие оборудование и транспортные средства для горной промышленности ведут активные исследования и разработки в данной области в течение последних лет. В РФ одним из наиболее успешных примеров использования автоматизированных систем управления горнотранспортными комплексами карьеров (АСУ ГТК) является система «КАРЬЕР» [3]. Эта система около 15 лет успешно используется в железорудных, угольных, золотодобывающих компаниях, компаниях по добыче цветных металлов России, Украины, Казахстана и Монголии и продолжает постоянно развиваться. Основные функциональные компоненты данной системы:

- модуль централизованного диспетчерского управления, выполняющий комплекс задач оперативного планирования и обеспечивающий подготовку необходимых для принятия решений информационно-справочных форм (планы-графики, сменные наряды, сводные отчеты и т.д.);

- комплекс навигационных приемников ГЛОНАСС/GPS, которые устанавливаются на все мобильные объекты и позволяют позиционировать объект с точностью в плане порядка 1–1,5 м. Этой точности достаточно для осуществления мониторинга и управления парком горнотранспортного оборудования;

- система беспроводной передачи данных: УКВ – связь, транкинговые системы, сотовые системы связи, а также широкополосные системы и технологии беспроводной передачи данных: WiFi, WiMax, MESH-системы и др., обеспечивающие надежное радиопокрытие и высокую скорость передачи данных, необходимую для передачи видеоизображений, диагностической информации и решения задач оперативного управления горнотранспортным комплексом;

- бортовая компьютерная система, установленная в кабине карьерных самосвалов, которая обеспечивает возможность многофункционального контроля (сбор, обработка и передача в диспетчерский центр навигационной и диагностической информации) и дистанционного управления горнотранспортными средствами. На рис. 1 представлена упрощенная схема технологического комплекса АСУ ГТК «Карьер».

Дальнейшее развитие системы осуществляется в рамках проекта «Интеллектуальный карьер» [2, 3].

При этом решаются теоретические вопросы и отрабатываются реальные практические задачи, связанные с созданием и использованием роботизированных комплексов карьерной техники – дистанционно управляемых и полностью автономных. Включение в состав ГТК роботизированных объектов, снабженных набором разнотипных датчиков, приводит к резкому увеличению объемов информации, поступающей в систему через средства телеметрии. Это расширяет круг решаемых функциональных задач и позволяет формировать новые, адекватные требованиям модернизированных технологий, подходы к решению традиционных для АСУ ТП задач. В настоящее время бортовые системы карьерных автосамосвалов являются по своим функциональным возможностям наиболее развитым элементом системы управления ГТК. Постоянное передвижение отдельных самосвалов по всей производственной зоне предприятия позволяет собирать информацию не только о самом объекте (автосамосвале), но и об окружающей технологической среде. Основными элементами бортового комплекса мобильного объекта (рис. 2) являются комплекс датчиков, обеспечивающих диагностику состояния мобильного объекта, а также блок оперативного контроля движения и навигационный блок.

В зависимости от типа решаемой задачи, собранные таким образом данные могут обрабатываться бортовыми компьютерами в оперативном режиме и передаваться на удаленные сервера для более детального анализа.

В настоящей работе рассматриваются вопросы построения различных вычислительных моделей необходимых для согласования и оптимизации режимов работы автономных мобильных объектов – мобильных агентов (МА) в процессе транспортирования горной массы. Эта проблема по существу является новой для горнотранспортных комплексов. Традиционно задача оптимального управления работой карьерного транспорта в процессе перемещения горной массы от источников (экскаваторы) к приемникам (пункты разгрузки, бункеры) сводится к задаче оптимального планирования маршрутов движения автосамосвалов и решается с использованием различных модификаций известной транспортной задачи. При этом для определенного временного интервала (например, рабочая смена) вычисляется такое распределение транспортных средств по маршрутам, которое должно обеспечить заданный (или в определенных постановках – максимальный) объем перевозок при минимизации затрат (расход топлива, простой транспорта и т.д.), а неизвестные параметры соответствующих уравнений определяются на основе имитационного моделирования.

Хотя, по существу, при транспортировании грузов автономными мобильными агентами возникают те же вопросы, что и в классической задаче, а именно: выбор для каждого МА конечных пунктов транспортирования и соответствующих маршрутов, а также

определение режимов движения, использование классических подходов к решению транспортной задачи в мультиагентной системе не имеет смысла. Это объясняется тем, что:

1. В процессе функционирования системы постоянно изменяется технологическая среда, в которой существуют агенты: периодически ухудшается состояние дорожного полотна на различных отрезках дорожной сети карьера, кроме того, из-за нарушений режимов работы и отказов транспортного оборудования, а также из-за нестационарности процессов экскавации, в течение смены может трансформироваться схема транспортной сети.

2. В силу перечисленных особенностей технологической среды, алгоритмы поведения (движения) агентов должны периодически корректироваться, с учетом фактического взаимного расположения автономных агентов на карьерных трассах в определенный момент времени.

3. Наконец, весь процесс работы транспортной системы координируется на нескольких уровнях (делиберативный, реактивный), что требует постоянного обмена информацией в рамках мультиагентной управляющей платформы. При этом принципиально изменяются традиционные схемы управления, ориентированные на постоянное участие диспетчерского персонала в принятии оперативных управленческих решений [1, 8, 10].

Будем рассматривать несколько типов вычислительных моделей, которые можно использовать для интерпретации ситуаций, прогнозирования состояния и режимов перемещения агентов на основе большого количества разнородной сенсорной информации. Эти модели образуют некоторый промежуточный (между делиберативным и реактивным) «вычислительный» слой, а использование механизмов прогнозной аналитики открывает возможности для постановки в дальнейшем различных оптимизационных задач в мультиагентной транспортной системе [8, 9].

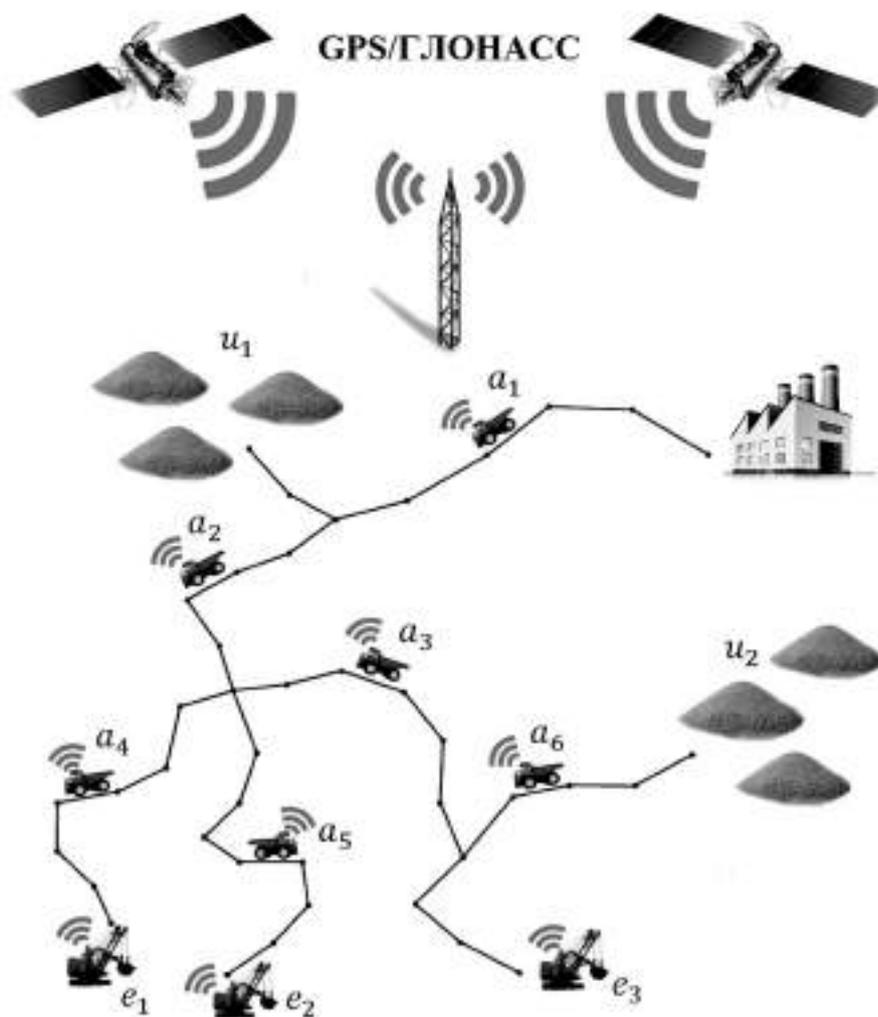


Рис. 1. Схема технологического комплекса АСУ ГТК «Карьер»



Рис. 2. Типовой набор бортового оборудования мобильных объектов системы управления ГТК

Транспортную сеть удобно представлять связным графом $G(m_s, R)$ где $m_s = m_1 + m_2 + m_3$ (m_1 и m_2 – терминальные узлы, m_3 – внутренние узлы), $R \subseteq m_s \times m_s$. Определенные последовательности ветвей r_1, r_2, \dots, r_p , упорядоченные таким образом, что первые и последние ветви этой последовательности инцидентны узлам $S_e \in m_1, S_f \in m_2$ образуют маршруты L_1, L_2, \dots, L_q движения автономных транспортных средств.

Рассмотрим основные элементы информационного массива, необходимые для решения задач прогноза и управления.

1. До начала работы системы известны качественные и количественные характеристики всех ветвей, то есть, например, фактическое состояние дорожного полотна на всех участках транспортной сети, а также геометрия отдельных ветвей и сети в целом. Каждый мобильный агент снабжен комплексом средств контроля (инклинометры, акселерометры, вибродатчики), обеспечивающих достаточный объем информации для оперативной идентификации нарушений дорожного полотна и формирования рейтинговой оценки качества конкретного участка транспортной сети [1, 5].

2. Используемые навигационные системы позволяют определять достаточно точно координаты $\{\tilde{x}_i(t_k), \tilde{y}_i(t_k), \tilde{z}_i(t_k)\}$ i -го транспортного средства в момент $t_k, k = [0, T]$ Вопросы повышения точности позиционирования и привязки реальной координаты к конкретной точке отрезка дороги транспортной сети подробно рассмотрены ранее [3, 6] и не обсуждаются в данной работе. Таким образом, считается, что имеется работоспособный механизм трансформации и проецирования координат, поэтому в дальнейшем для упрощения записи будем координаты мобильного агента

a_i в момент t_k в пределах транспортной сети обозначать $\tilde{x}_i[k]$.

3. Для каждого мобильного агента в любой момент времени определены пункты назначения e_{S_1} и u_{S_2} , $S_1 = 1, m_1, S_2 = 1, m_2$, где m_1 – общее количество погрузочных пунктов (экскаваторов), m_2 – количество пунктов разгрузки. На начальном этапе (этапе обучения) процедура назначения конечных пунктов каждому агенту может осуществляться случайным образом или экспертным способом. Иными словами, эффективность работы системы на этапе обучения не учитывается, а работоспособность обеспечивается за счет определенных правилами безопасности регламентов и реактивных механизмов управления, реализуемых бортовыми системами управления мобильных объектов.

4. В каждый момент времени k агент a_i движется по некоторой заданной трассе $L_i[e_{S_1}, u_{S_2}]$, $S_1 = 1, m_1, S_2 = 1, m_2$ а весь маршрут по схеме $\{u_{S_1} - e_{S_1} - u_{S_2}\}$ образует полный цикл для i -го агента. В ходе прохождения агентом очередного цикла фиксируется:

- время, затраченное агентом на реализацию данного маршрута – $\tilde{T}_i(L_i)$;
- количество остановок или резких торможений в цикле – n_i ;
- вектор скоростей $\bar{v}_i[k], k = [0, T_i]$ и средняя скорость \bar{v}_i в пределах цикла.

Оптимальное управление в данной мультиагентной системе заключается в определении для каждого агента таких терминальных вершин и такой средней скорости в пределах цикла \bar{V}^*, E^*, U^* , которые обеспечивали бы минимальное (максимальное) значение некоторого интегрального критерия функционирования системы F_Σ .

В современных АСУ ГТК в качестве критериев оптимизации предлагается использовать такие, например, как [2,5]:

- минимизация очередей у экскаваторов;
- равномерность производительности экскаватора;
- выполнение плановых заданий загрузка/разгрузка по количеству горной массы.

Поскольку целесообразность использования подобных критериев в мультиагентной интеллектуальной системе не очевидна, мы не будем обсуждать способы формального задания глобального критерия в одной из приведенных формулировок.

Используем для организации согласованного и рационального движения агентов ряд эвристических оценочных критериев, которые вычисляются на основе прогнозных моделей.

Режим взаимодействия агентов зафиксируем следующим образом:

a – любые вычислительные операции осуществляются в строго определенные моменты времени – *k*.

b – ранжирование агентов и определение приоритетных терминальных вершин осуществляется в одном из трех вариантов:

1. При достижении терминальной вершины любым агентом;
 2. При завершении очередного цикла произвольным агентом;
 3. При завершении очередного цикла всеми агентами.
- c* – обмен информацией (координаты, скорость) производится в определенные моменты времени.

d – движение агентов осуществляется без предварительной синхронизации и ранжирования.

Итак, реально состояние мобильного агента $a_i[k]$ в момент времени *k* описывается вектором:

$$\{\tilde{x}_i(k), e[S_1, i, k], u[S_2, i, k], v_i[k]\} \quad (1)$$

Скорость каждого агента в фиксированный момент времени *k* будем выбирать таким образом, чтобы минимизировать количество опасных сближений (встречное движение, попутное движение, перекрестки), что весьма важно при работе автономных агентов.

Возможны различные способы формального задания этого критерия, например:

$$F = \sum_{k=0}^T \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \{\hat{x}_i[k+1] - \hat{x}_j[k+1]\}^2 \rightarrow \max \quad (1)$$

или:

$$F = \min \left\{ \sum_{k=0}^T \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \delta_{ijk} \right\} \quad (3)$$

где $\delta_{ijk} = |x_i[k] - x_j[k]|$ можно вычислять как

$$\delta_{ijk} = \begin{cases} 1, & |x_i[k] - x_j[k]| \geq \varepsilon \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$\hat{x}_i[k+1]$ – прогнозируемое состояние агента в момент времени *k* + 1. В зависимости от выбора модели для прогнозирования (нейронные сети, полиномиальная или логическая регрессия, нейро-нечеткие модели) меняется форма задания критерия. При использовании наиболее хорошо интерпретируемых регрессионных моделей, оптимальные значения скоростей находятся с помощью традиционных методов оптимизации:

$$\hat{V}_i[k+1]: F\{\hat{x}_i[k], \hat{x}_i[k+1], \dots, \hat{x}_i[k+l]\} \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $i = \overline{1, N}, l = \overline{1, T_0}, \bar{V}_i[k+1] \leq \hat{V}_i[k+l] \leq V_{i_{\max}}$.

При выборе терминальных вершин предлагается использовать критерий, связанный с минимальным прогнозным временем прохождения маршрута для каждого следующего агента, завершившего цикл:

$$F = \min \{ \hat{T}_i(L_j) \} \quad (5)$$

где $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, m_3}, m_s = m_1 \times m_2, L_j$ – длина *j*-го маршрута.

Оценку времени, затрачиваемого на прохождение маршрута соответствующим агентом, предлагается осуществлять с помощью линейной зависимости вида:

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha}_1 x_1(j) + \hat{\alpha}_2 x_2(j) + \hat{\alpha}_3 x_3(j) \quad (6)$$

где \hat{y}_i – оценка времени, затрачиваемого *i*-м агентом на прохождение маршрута;

x_1 – длина соответствующего маршрута;

x_2 – количество особых точек на маршруте;

x_3 – средняя скорость на маршруте.

Коэффициенты $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3$, соответствующих регрессионных уравнений определяется на основе массива данных, полученных на этапе обучения.

Теперь рассмотрим основные этапы построения и схемы использования вычислительных моделей в мультиагентной транспортной системе.

– Выполняется несколько циклов транспортирования в режиме обучения системы. В этом режиме осуществляется идентификация нарушений дорожного покрытия и ранжирования участков дорожных маршрутов для определения скоростных режимов. Пункты назначения при переходе от цикла к циклу изменяются случайным образом для всех агентов. Идет процесс накопления информации для построения моделей прогноза.

– Полученный информационный массив используется для построения вычислительных моделей, способных прогнозировать состояния агентов системы и вычислять оценку текущих состояний. С функциональной точки зрения рассматриваются три вида моделей:

1. Модели прогнозирования координат каждого агента на некоторое количество шагов вперед *k*+*t*.



Рис. 3. Схема взаимодействия модулей

2. Модели вычисления прогнозных значений скорости движения для каждого агента F_1, F_2, \dots, F_N .

3. Вычисление и оптимизация некоторого критерия F_Σ по итогам завершения цикла транспортирования для каждого агента.

– На определенном шаге k вычисляются прогнозныe координаты для каждого из агентов $\hat{x}_i[k+1]$.

– Определяются корректирующие поправки скоростных режимов агентов.

– Выполняется обмен информацией между агентами.

– Этапы [3–5] повторяются до тех пор, пока либо один из агентов не достигнет терминальной вершины, либо все агенты не завершат свои циклы.

В первом случае процедура ранжирования реализуется естественным образом. Для каждого следующего агента вычисляются прогнозныe значения критерия $\hat{F}_i[L_p]$ по различным маршрутам. То есть для каждого следующего агента выбирается условно оптимальный маршрут. Во втором случае, при зависимости от положения агентов на трассе прогнозируется ранжирование агентов, исходя из некоторого интегрального критерия F_Σ , а затем выполняется процедура назначения маршрутов.

С точки зрения наглядности и удобства интерпретации результатов наиболее удобным являются линейные или полиномиальные регрессионные модели. Однако вычислительные эксперименты показывают, что более точные прогнозы достигаются при использовании нейросетевых моделей.

Для прогноза состояния агента по схеме [11]:

$$\varphi_1 : \{\tilde{v}[k], \tilde{x}[k], \{\beta\}\} \rightarrow \hat{x}[k+1], \quad (7)$$

где

$\tilde{v}[k]$ – вектор скоростей агентов на шаге k ;

$\tilde{x}[k]$ – координаты агентов на шаге k ;

$\{\beta\}$ – количество настраиваемых параметров,

использовались ИНС обратного распространения $\{i_{p_1}, h_{p_2}^1, h_{p_3}^2, o_{p_4}\}$ со значениями $p_1 = 8, p_2, p_3 \leq 10, p_4 = 4$.

При определении вектора скоростей в роли линейного регулятора использовалась радиально-базисная сеть с внешними обратными связями.

Между мобильными агентами осуществляется постоянный обмен информацией, т.е. определяя прогноз состояния и режим движения i -го агента в момент времени $k+1$, необходимо учитывать не только состояние всех остальных агентов в момент времени k , но и их прогнозныe координаты:

$$\hat{x}_i[k+1] = \varphi_1 \{\tilde{x}_i[k], \dots, \tilde{x}_N[k], \hat{x}_i[k+1], \dots, \hat{x}_N[k+1], \{\beta\}\} \quad (8)$$

здесь $\{\beta\}$ – множество неизвестных параметров, которые определяется в процессе обучения.

В целом схема взаимодействия комплекса модулей, реализующих рассмотренные вычислительные процедуры, представлена на рис. 3.

При построении моделей прогнозирования использовались стандартные инструменты машинного обучения среды Scikit-learn. Вычислительные эксперименты осуществлялись с использованием специально построенных имитационных моделей. В процессе моделирования основные параметры варьировались в следующих диапазонах:

– терминальные вершины e [3–5], u [2–3];

– количество мобильных агентов N [3–7];

- количество циклов обучения [10–30].
- количество рабочих циклов [5–10].

Эксперименты показали, что суммарное время реализации рабочих циклов в случае использования вычислительных моделей для прогноза состояния, оценки временных затрат и обоснованного выбора и изменения маршрутов, с учетом информации о состоянии всех агентов, уменьшается на величину от 7% до 30%.

Литература

1. Принципы и модели интеллектуального управления роботизированными объектами горнотранспортного комплекса карьера / И.О. Темкин [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – Спец. выпуск № 1. – С. 233–242.
2. Клебанов, А. Ф. Информационные системы горного производства и основные направления развития автоматизации открытых горных работ / А.Ф. Клебанов // Горная промышленность. – 2015. – № 2 (120). – С. 93–96.
3. Современные системы управления горнотранспортными комплексами / под редакцией акад. РАН К.Н. Трубецкого. – СПб.: Наука, 2007 – С. 114–126.
4. Темкин, И. О. Интеллектуальные системы управления горнотранспортными комплексами: современное состояние, задачи и механизмы решения / И.О. Темкин, Д.А. Клебанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – Спец. выпуск № 1. – С. 257–266.
5. Клебанов, Д. А. Контроль качества дорог на горнодобывающих предприятиях / Д.А. Клебанов, Н.В. Одинцев // Горная промышленность – 2009. – № 3. – С. 24.
6. Fiosina, J. Decentralized regression model for intelligent forecasting in multi-agent traffic networks / J. Fiosina // In: S. Omatu et. (ed.) AISC – 9th Int. Conf. on Distributed Comp. and AI. (DCAI'12), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. – 2012. – Vol. 151. – P. 255–263.
7. Jiang, B. Vehicle Speed Prediction by Two-Level Data Driven Models in Vehicular Networks / B. Jiang, Y. Fei // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems –2016, November. – P. 17–26.
8. Claes, R. A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems / R. Claes, T. Holvoet, D. Weyns // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. – No. 2. – P. 364–373.
9. Темкин, И. О. Проблемы моделирования взаимодействия интеллектуальных агентов на горнопромышленном предприятии / И.О. Темкин, А.Н. Гончаренко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 4–2 (183). – С. 252–259.
10. Куляница, А. Л. Семиотические подходы к построению мультиагентной модели организационных предметных областей / А.Л. Куляница, О.Е. Фомичева // Информация и Космос. – 2015. – № 1. – С. 94–98.
11. Temkin, I. Application of intellectual system for robotic coal plough machine control in complex mine-geological conditions / I. Temkin, A. Kulyanitsa, S. Kubrin // Reports of the XXIII international scientific symposium «MINER'S WEEK – 2015». – National University of Science and Technology «MISiS», 2015. – P. 274–280.

Оптимальное в смысле заполнения квантование информации при наличии случайных ошибок в квантах

Optimal quantization of information in the sense of filling in the presence of random errors in quanta

Смагин / Smagin V.

Владимир Александрович

(va_smagin@mail.ru)

доктор технических наук, профессор,

заслуженный деятель науки РФ,

действительный член МАИ.

ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

профессор кафедры метрологического обеспечения.

г. Санкт-Петербург

Ширямов / Shiryamov O.

Олег Анатольевич

(mood2@yandex.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

адъюнкт кафедры метрологического обеспечения.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: оптимальное квантование информации – optimal quantization of information; квант – quantum; оптимальная величина пробела между квантами – optimal value of the gap between quanta; случайные ошибки в кванте – random errors in the quantum.

Решается задача оптимального в смысле заполнения квантование информации при условии возникновения случайных ошибок в квантах и определения величины пробела между квантами для устранения этих ошибок.

The problem of the optimal quantization of information in the sense of filling is being solved under the condition of random errors in quanta and the determination of the gap between quanta to eliminate these errors.

Введение

В современных автоматизированных системах управления информация хранится, обрабатывается и передается в виде специальных дискретных единиц (бит, байт, пакет и т.д.). На более высоком уровне абстрагирования можно говорить о структурных порциях или квантах информации. Кванты информации объединяются в информационные массивы. При этом решение задач в сложных системах часто связано с различными факторами неопределенности, как внутренними, так и внешними. Таким образом, объемы массивов хранимой, обрабатываемой и передаваемой информации в общем случае являются случайными, и в адаптивных системах

существует возможность выбора, в установленных техническими характеристиками пределах, размера квантов информации для выполнения системой определенных операций. Очевидно, что при этом возникает задача оптимального квантования информации по критерию минимума потерь.

Первые основополагающие результаты решения теории ценности информации с учётом стоимости были решены в статье [1], и оптимизируемая функция квантованной величины представлена в виде математического ожидания величины потерь:

$$\Psi(x) = \int_0^{\infty} [x(E(z/x) + 1) - z] dF(z) + cJ + \text{const}, \quad J = \int_0^{\infty} E(z/x) dF(z). \quad (1)$$

Первое слагаемое – средние потери за счёт искажения значения случайной величины информации z в результате квантования, второе слагаемое – потери за счёт использования неполного количества информации J .

В работе [2] авторы, ссылаясь на работу [1], аналогичную функцию квантуемой величины представляют в виде:

$$\Psi(x) = (x + c) \int_0^{\infty} (E(z/x) + 1) dF(z), \quad (2)$$

где x – величина кванта, c – величина промежутка между квантами, $E(\alpha)$ – целая часть числа α , $F(z)$ – функция распределения квантуемой случайной величины z , имеющей конечное математическое ожидание.

В статье [3] был предложен новый подход к квантованию случайной величины путем введением функции

распределения величины кванта, а не только его фиксированного значения.

Но во всех цитируемых работах предполагалось, что величина пробела между квантами x является фиксированной величиной и не зависит от кванта x . Но в процессе хранения, передачи и обработки квантованной случайной величины могут возникать ошибки, приводящие к искажению или потере информации. Эти ошибки могут быть обусловлены различными факторами. Для повышения достоверности квантованной информации необходимо при получении каждого кванта проводить его контроль на наличие ошибок, и при необходимости исправлять их. Однако на устранение требуются затраты времени. Таким образом, величина пробела может увеличиваться на время восстановления предшествующего кванта, что приводит к уменьшению реального количества квантов. Очевидно, что возникает задача выбора оптимальной величины пробела между квантами при условии наличия случайных ошибок в квантах и необходимого времени на их исправление.

Сущность метода и его формализация. Рассмотрим два возможных варианта возникновения ошибок в квантах. В первом случае появление ошибок в случайном процессе подчинено закону Пуассона, во втором – геометрическому закону распределения. При этом на исправление одной ошибки в кванте затрачивается некоторое время τ .

Тогда, согласно (2), выражение для определения величины математического ожидания квантованной случайной величины для первого случая будет записано в виде

$$M_\lambda(x) = \left[x + \tau \sum_{k=0}^{\infty} \left(k e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^k}{k!} \right) \right] \int_0^{\infty} \left[E\left(\frac{z}{x}\right) + 1 \right] f(z) dz, \quad (3)$$

где $\tau \sum_{k=0}^{\infty} \left(k e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^k}{k!} \right)$ – пробел между квантами, обусловленный временем исправления ошибочного кванта величиной x , в котором может возникнуть некоторое среднее число k ошибок с интенсивностью λ .

Для второго случая

$$M_p(x) = \left[x + \tau \sum_{k=0}^{\infty} \left(k (p(1-p)^{k-1}) \right) \right] \int_0^{\infty} \left[E\left(\frac{z}{x}\right) + 1 \right] f(z) dz, \quad (4)$$

где p – вероятность возникновения ошибки.

Закон возникновения ошибок может быть любым. Приведенные в статье законы распределения выбраны в связи с тем, что они являются стационарными. Таким образом, вероятность появления ошибки не зависит от того, сколько их было до этого.

Пусть время, затраченное на исправление одной ошибки, составляет одну единицу. При этом предположим, что случайные ошибки возникают с разными параметрами, которые определяются значениями λ, p . Пусть при низких значениях появления случайных ошибок λ, p , будут равны 0,1, при средних – $\lambda, p = 0,5$, а при высоких – $\lambda, p = 0,9$.

В таблице 1 представлены расчетные параметры (3), (4) при разных значениях λ, p : где m – математическое ожидание, d – дисперсия и σ – среднеквадратическое отклонение.

Если представить величину пробела между квантами как сумму математического ожидания и одного среднеквадратического отклонения возникновения ошибки, при этом (3), (4) будут определяться так

$$M_\lambda(x) = (x + \tau(m_\lambda + \sigma_\lambda)) \int_0^{\infty} (E(z/x) + 1) df(z), \quad (5)$$

$$M_p(x) = (x + \tau(m_p + \sigma_p)) \int_0^{\infty} (E(z/x) + 1) df(z). \quad (6)$$

Далее будем полагать, что закон распределения поступающей информации нормальный с плотностью вероятности

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(x-m_0)^2}{2\sigma_0^2}}. \quad (7)$$

и имеет следующие параметры: $m_0 = 100$ ед., $\sigma_0 = 20$ ед.

На рис. 1 представлены графики выражения (5). Кривые на рисунке соответствуют: $M_{\lambda 1}(x)$ при $\lambda = 0,1$, $M_{\lambda 2}(x)$ при $\lambda = 0,5$, $M_{\lambda 3}(x)$ при $\lambda = 0,9$.

Аналогично на рис. 2 представлены графики выражения (6), со следующими параметрами: $M_{p 1}(x)$ при $p = 0,1$, $M_{p 2}(x)$ при $p = 0,5$, $M_{p 3}(x)$ при $p = 0,9$.

В таблице 2 приведены данные расчета для всех шести моделей: x_0 – оптимальное значение кванта, $\alpha(x_0)$

Таблица 1

Параметр	Значение					
	$\lambda=0,1$	$p=0,1$	$\lambda=0,5$	$p=0,5$	$\lambda=0,9$	$p=0,9$
m	12,485	1,111	62,461	1,998	11,736	9,992
d	168,35	1,358	$3,365 \cdot 10^3$	5,857	$1,266 \cdot 10^4$	189,231
σ	3,532	0,351	7,985	1,38	13,177	9,454

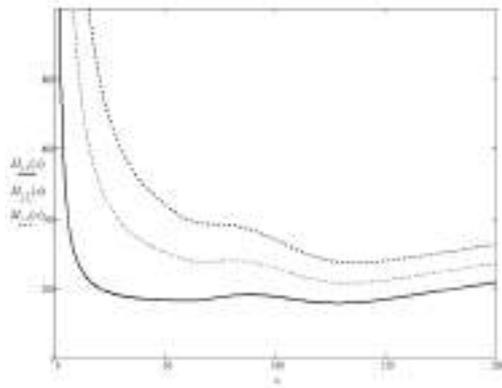


Рис. 1

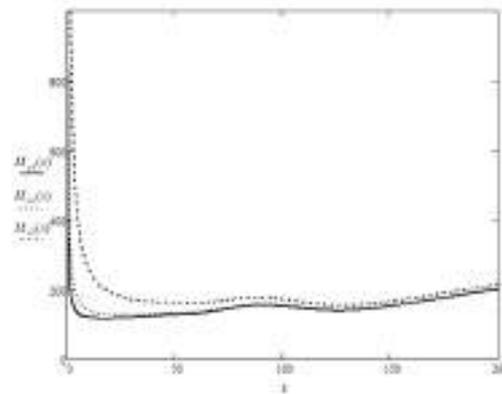


Рис. 2

– значение второго начального момента количества квантованной информации, $\sigma(x_0)$ – значение среднего квадратического отклонения количества квантованной информации, c – величина пробела между квантами.

Далее проведем расчёт зависимости изменения величины пробела между квантами от изменения значений λ , ρ и интерполируем полученные числовые данные.

Полученные кривые будут характеризовать зависимости выбора величин пробелов между квантами от параметра λ для закона распределения Пуассона (рис. 3) и ρ для геометрического закона (рис. 4).

Таким образом, используя приведенный выше алгоритм, можно рассчитать необходимую величину пробела между квантами для разных вариантов передачи информации.

Пример. В качестве практического примера рассмотрим следующий случай. Пусть передается поток информации без ошибок и с заданной функцией. Закон распределения поступающей информации нормальный с исходными параметрами (7). Оптимальные пробелы между квантами $c = 3$ ед. Тогда выражение для математического ожидания квантованной величины представляется в виде:

$$M(x) = (x + c) \int_0^{\infty} (E(z/x) + 1) df(z). \quad (8)$$

Таким образом, минимальная величина квантованной случайной величины будет $M = 125,98$ ед. при оптимальном кванте $x = 24,78$ ед.

Предположим, что в какой-то момент возникает фактор, приводящий к ошибкам в кванте. Возникновение ошибок распределено по закону Пуассона с параметрами $\lambda \leq 0,4$. При этом время на исправление одной ошибки кванта составляет $\tau = 2$ ед.

При таких условиях значения параметров в соответствии с (3) будут: $m = 9,91$, $d = 108,17$ и $\sigma = 3,15$. Для определения величины пробела между квантами, которая позволит гарантированно исправить ошибки применим правило трех сигм, тогда величина пробела между квантами будет определяться как

$$c = \tau(m + 3\sigma). \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получаем

$$M_1(x) = (x + \tau(m + 3\sigma)) \int_0^{\infty} (E(z/x) + 1) df(z). \quad (10)$$

Таким образом, выражение (10) позволяет определить, что оптимальное значение кванта 137,03 ед., а минимальное значение квантованной случайной величины 288,80 ед. при величине пробела между квантами 41,71 ед.

Таблица 2

Номер модели	Параметры			
	x_0	$\alpha(x_0)$	$\sigma(x_0)$	c
$\Psi_{\lambda 1}(x)$	126,456	$5,311 \times 10^3$	72,877	16,017
$\Psi_{\rho 1}(x)$	18,190	$3,009 \times 10^3$	54,854	1,462
$\Psi_{\lambda 2}(x)$	129,937	$3,509 \times 10^4$	187,315	70,446
$\Psi_{\rho 2}(x)$	26,597	$3,836 \times 10^3$	61,943	3,368
$\Psi_{\lambda 3}(x)$	135,703	$8,312 \times 10^4$	288,307	124,913
$\Psi_{\rho 3}(x)$	128,220	$6,614 \times 10^3$	81,325	19,447

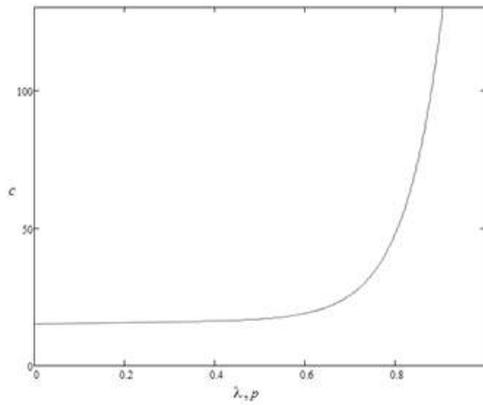


Рис. 3

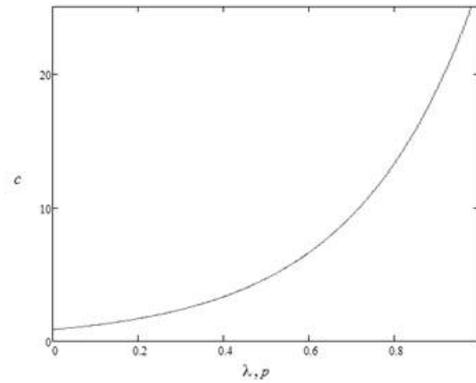


Рис. 4

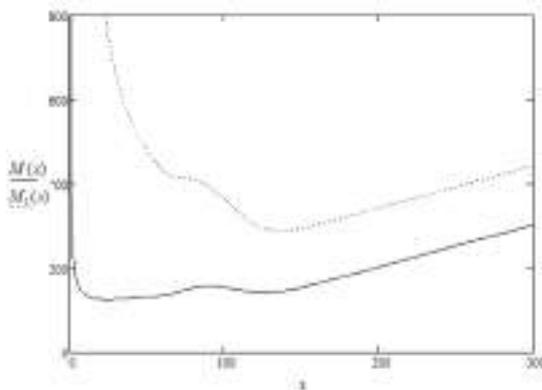


Рис. 5

На рис. 5 представлены графики функций $M(x)$ и $M_1(x)$.

Заключение

В отличие от решения задачи оптимального в смысле заполнения квантования информации с постоянной величиной пробела между квантами в данной статье решена задача оптимального квантования информации при условии, что величина пробела между квантами не является фиксированной. Она зависит от числа случайных ошибок, появившихся в квантах информации, умноженных на время устранения одной ошибки.

Полученные результаты позволяют определить случайные потери информации из-за возникающих ошибок и более объективно отражать процесс передачи, хранения и преобразования информации в различных системах.

Литература

1. Гришанин, Б. А. Учёт ценности информации в теории ценности информации / Б.А. Гришанин // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1967. – № 2. – С. 9–10.

2. Андронов, А. М. Оптимальное в смысле заполнения квантование информации / А.М. Андронов, Т.Н. Бокоев // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1979. – № 3. – С. 154–158.

3. Смагин, В. А. Определение гарантированной функции распределения величины кванта в задаче квантования информации / В.А. Смагин, С.А. Шерстобитов, О.А. Ширямов // Информация и Космос. – 2016. – № 2. – С. 72–76.

Метод формирования семантической модели оперативной обстановки в системах управления организационного типа

Method of formation of a semantic model of operational situation in organizational management systems

Брунилин / Brunilin A.

Алексей Александрович

(ale483@mail.ru)

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени

Маршала Советского Союза С. М. Буденного»

(ВАС им. С. М. Буденного) МО РФ,

адъюнкт.

г. Санкт-Петербург

Саенко / Saenko I.

Игорь Борисович

(ibsaen@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ВАС им. С. М. Буденного,

профессор.

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

Введение

В отличие от систем управления технологического типа (производственных, добывающих, транспортных отраслей и пр.), системы управления организационного типа (СУОТ) в процессе выработки решений оперируют сведениями более широкого круга предметных областей и с большей степенью неопределенности. Исходные данные в СУОТ, используемые для обоснования принятия решений, также характеризуются малым временем устаревания, что накладывает требования по оперативности обработки разнородных и слабоструктурированных данных.

Выработка управляющих воздействий в СУОТ должна основываться на всестороннем анализе исходных данных об оперативной обстановке. Под оперативной обстановкой в данном случае понимается совокупность сведений о составе, состоянии управляющего и управляемого объектов, условиях выполнения и обеспечения применения управляющих воздействий [1].

На практике аналитическая обработка сведений об оперативной обстановке при выработке решения на применение управляющих воздействий сводится к решению информационных и расчетных задач.

Для решения задач такого типа в настоящее время широко используются средства искусственного интеллекта, основанные на семантических моделях (далее – СМ), в том числе программные онтологии. Онтологии

Ключевые слова: онтология – ontology; семантические модели – semantic models; искусственный интеллект – artificial intelligence; логический вывод – logical production; разнородные данные – heterogenic data; гетерогенные информационные системы – heterogeneous information systems; системы управления организационного типа – organizational management systems.

Рассматривается метод поэтапного формирования семантической модели оперативной обстановки для систем управления организационного типа. Приводится формализация целевого результата метода, процедур синтаксического и семантического анализа концептов, адаптирующих действий. Применяется комбинация иерархического и параметрических методов декомпозиции критериев применительно к семантическим моделям.

The method of step-by-step formation of a semantic model of operational situation in organizational management systems is considered. The formalization of the target result of the method, the procedures for syntactic and semantic analysis of concepts, and adaptive actions have been given. A combination of hierarchical and parametric methods of decomposition of criteria has been applied to semantic models.

представляют собой способ организации баз знаний, формирование которых происходит с помощью задания формальной семантики понятий и связей между ними [2, 3]. Семантика (формализация смысла) описывается языком дескрипционных логик, что позволяет выполнять автоматические рассуждения с целью формирования выводов по заданному к онтологии вопросу.

Основными преимуществами онтологий являются наличие собственных машин логического вывода (ризо-неров), практическая разрешимость алгоритмов логического вывода и высокая гибкость при организации информационных структур разнородных и слабоструктурированных данных [4, 5].

В настоящее время не существует единой модели оперативной обстановки ввиду сложности и многоаспектности данного понятия. Автоматизация управленческой деятельности производственных и информационных процессов ведется в направлении узкопрофильной автоматизации по направлениям деятельности. Практика создания и эксплуатации таких программных решений показывает, что при приемлемой эффективности разрабатываемые программные сегменты обладают низкой совместимостью. Данный факт вступает в противоречие с требованиями к управлению, высокая эффективность которого может быть достигнута только в условиях комплексного анализа разнородных исходных данных и результатов их обработки. Для устранения данного противоречия предлагается метод поэтапного формирования семантической модели оперативной обстановки (СМОО), рассмотрение которого является основной целью настоящей статьи.

Постановка задачи

Предлагаемый метод M рассматривает СМОО \mathbb{Q}_W как совокупность взаимодействующих предметных областей (далее – ПрО) $T(W) = \{t_p\}$, где $p = 1; P$ – количество ПрО СМОО, W – множество задач, входящих в состав СМОО, причем задачи $w_i \in W, i = 1; I$ могут использовать различные ПрО, а одна и та же ПрО может быть задействована различными задачами. Под предметной областью понимается условно обособленный набор концептов (терминов и их классов), объединенных по принципу тематической общности $t_p = \{c_{k_p}\}, k_j = 1; K_j$.

Предлагаемый метод заключается в формировании СМОО \mathbb{Q}_W путем последовательного создания моделей задач O_{w_i} с добавлением их к СМОО и установлением логических взаимосвязей между формализуемыми в процессе формирования предметными областями.

Целевым результатом метода $M(W)$ принимается описание конечной последовательностей действий $\{s_j\}$, приводящее к созданию СМ задачи в виде онтологии O_{w_i} . Полученная онтология должна давать возможность при вводе исходных данных I_{w_i} по совокупности критериев Y_{w_i} находить требуемый и допустимый ответ z_{w_i} , получаемый по правилам логического вывода.

При этом используемая совокупность ПрО задачи T_{w_i} должна охватывать достаточный объем понятий,

используемых для описания исходных данных, получения всех промежуточных и итоговых результатов.

Тогда формально целевой результат метода создания фрагмента модели СМОО можно представить в виде системы утверждений:

$$\left\{ \begin{array}{l} M(W) = \{s_j\}, j = 1; J, J \ll \infty, \\ \exists O(M(W)) : \mathbb{Q}_W = \text{sem} \bigcup_{i=1}^I R(O_{w_i}), w_i \in W \forall i = \overline{1; I} \\ O_{w_i}(T_{w_i}, Y_{w_i}, I_{w_i}) \rightarrow z_{w_i} \end{array} \right. \quad (1)$$

где $O_{w_i}(T_{w_i}, Y_{w_i}, I_{w_i})$ – онтология задачи w_i , позволяющая получить приемлемый искомый результат z_{w_i} при обработке совокупности концептуализированных предметных областей T_{w_i} , связанных с задачей w_i онтологий $\overline{O}_{w_i}^{\text{тр}} = \{o_r^{\text{тр}}(w_i)\}, r = 0; R, \overline{O}_{w_i}^{\text{тр}} \in \mathbb{Q}_W$, и выполняющая манипуляции с входными данными I_{w_i} ;

$\text{sem} \bigcup R(O_{w_i})$ – оператор семантического объединения СМОО;

$R(\dots)$ – оператор редукции семантической модели, устраняющий избыточность и семантическую неоднозначность моделируемых ПрО.

Описание метода

Этапы получения целевого результата показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1, метод формирования СМОО состоит из двух основных этапов: концептуализации предметных областей и проекции полученной СМ непосредственно в СМОО.

На начальном этапе группа экспертов, привлеченная для моделирования задачи, в ходе формулирования метаданных задачи (п. 1.1 рисунка) предварительно определяет формирующее множество ПрО $\langle T_{w_i}^* \rangle$ и множество сопутствующих ПрО $\langle \overline{T}_{w_i} \rangle$, концептами которых оперирует задача, а также определяет множество исходных данных I_{w_i} , требуемых для ее решения. Кроме того (п. 1.2), определяются критерии решения задачи $Y_{w_i}^0 = F(\overline{y}_{w_i}^0)$, где $\overline{y}_{w_i}^0 = \{y_1, y_2, \dots, y_j\}$ – набор утверждений, справедливость которых будет свидетельствовать о нахождении решения задачи, F – логический функционал, обеспечивающий взаимосвязь критериев.

Основным видом работы, выполняемых на этапе концептуализации ПрО, является последовательная декомпозиция критериев Y_{w_i} до множества концептов $C_{w_i} = \{c_l\}, l = 1; L$, где L – количество концептов модели O_{w_i} . Данному шагу должно предшествовать определение экспертами множества элементарных концептов $I_{w_i}^0$, задающее практический предел декомпозиции критериев. Под элементарными понимаются концепты, которые могут быть получены в явном виде стандартными способами (наблюдением, считыванием с карты, рассчитаны с применением введенных установленным порядком расчетных задач и проч., т.е. с помощью способов, не требующих сложной логической обработки исходных данных).



Рис. 1. Этапы метода формирования СМОО

В ходе декомпозиции критериев предлагается применять сочетание методов структурной и иерархической декомпозиции [6]. Результат декомпозиции на k -ом шаге (п. 1.3), ограничиваемый совокупностью $I_{w_i}^0$, формулируется в виде:

$$Y_{w_i} = (k, I_{w_i}^0) \equiv \{F_k([\bar{Y}_{kj_k}]^T)\}, \quad (2)$$

где \bar{Y}_{kj_k} – набор векторов элементарных концептов, полученный в результате преобразования j -го критерия на k -м шаге итерации;

F_k – преобразованный по правилам дескрипционной логики функционал взаимосвязи критериальных утверждений на k -м шаге.

С учетом (1) и (2) результатом этапа концептуализации (п. 1.4) является онтология ПрО задачи $O_{w_i}(T_{w_i}, Y_{w_i}(k, I_{w_i}^0), I_{w_i})$, именуемая в дальнейшем концепцией задачи.

Этап проекции предлагаемого метода начинается с анализа ПрО рассматриваемой задачи (п. 2.1). На практике в большинстве случаев анализ T_{w_i} приводит к разбиению ее на совокупность подмножеств \bar{T}_{w_i} (ПрО, имеющие проекции в СМОО), \bar{T}_{w_i} (ПрО, не имеющие проекции в СМОО и имеющие вероятность автономного использования другими задачами) и $T_{w_i}^*$ – собственно ПрО рассматриваемой задачи или формирующая ПрО. Тогда, используя аналогичную систему обозначений, множество концептов задачи, обозначаемое C_{w_i} , будет эквивалентно объединению подмножеств:

$$C_{w_i} = C_{w_i}^* \cup \bar{C}_{w_i} \cup \bar{C}_{w_i}', C_{w_i}^* \neq 0 \quad (3)$$

Такое деление концептов рационально с точки зрения выполнения синтаксического и семантического анализа.

Комплексный анализ (пп. 2.2, 2.3) проводится с целью устранения проблемных ситуаций, возникших в ходе создания концепции задачи и выявленных на стадии анализа. Основной сложностью при использовании нескольких онтологий выступает появление омонимов – одинаковых по написанию (синтаксису) и семантически различных концептов. В ряде программных оболочек наличие омонимов в разных онтологиях не вызывает критической программной ошибки. Однако практический опыт разработки онтологий говорит о том, что подобное явление крайне нежелательно, т.к. оно ведет к сложностям интерпретации результатов работы логического вывода [2, 3].

Локализация омонимов выполняется путем проведения синтаксического анализа множества концептов C_{w_i} , заключающегося в проверке гипотезы:

$$\exists c_l \in O_{w_i} : \text{synt_id}(c_l) = \text{synt_id}(c_l'), c_l' \in Q_w, l = \overline{1; L}, \quad (4)$$

где c_l и c_l' – анализируемый элемент концепции и соответствующий ему омоним СМОО;
 synt_id – текстовый идентификатор концепта;
 L – общее количество концептов создаваемой онтологии.

При обнаружении омонимов выполняется семантический анализ пары концептов, формализуемый с учетом (4) следующей гипотезой:

$$\exists c_l \in Q_w : \text{sem}(c_l) \approx \text{sem}(c_l') \quad (4)$$

где $\text{sem}()$ – семантика концепта.

Если гипотеза (5) признается истинной для анализируемого элемента c_l концепции, то данный элемент

Результаты проведения анализа и адаптирующие действия

Анализ элемента c_i		Адаптация элементов концепции по подмножествам:		
Synt	Sem	$C_{c_i}^*$	\overline{C}_{c_i}	$\overline{C}_{c_i}^*$
$\exists c_i$	$\exists o_r$	$\text{synt_id}(c_i) := \text{ref}(o_r), \text{attr}(c_i) := \text{true}$		
	$\exists o_r$	$\text{synt_id}_m(c_i) := \text{synt_id}_{m+1}(c_i), \text{attr}(c_i) := \text{true}$		
$\forall c_i$		$\text{attr}(c_i) := \text{true}$ $\text{attr}(c_i) := \text{synt}(\text{name}(T_{c_i}^*))$	$\text{attr}(c_i) := \text{true}$ $\text{attr}(c_i) := \text{synt}(\text{name}(O_{c_i}^*))$ $\text{attr}(c_i) := \text{ref}(o_r), o_r \in O_{c_i}^*$	$\text{attr}(c_i) := \text{true}$ $\text{attr}(c_i) := \text{synt}(\text{name}(T_{c_i}^*))$ $\text{attr}(c_i) := \text{ref}(c_i), c_i \in T_{c_i}^*$

считается имеющим полный аналог в СМОО и заменяется ссылкой на элемент c' :

$$c_i := \text{ref}(c') \quad (6)$$

В противном случае выполняется уточнение его текстового идентификатора:

$$\text{synt_id}_m(c_i) := \text{synt_id}_{m+1}(c_i), m = \overline{M} \quad (7)$$

где m – номер итерации, M – количество итераций, требуемых для устранения идентичности имен семантически различных концептов.

Действия, описанные выражениями (4–7), составляют уточняющий цикл комплексного анализа, который производится со всем полученным в СМ множеством концептов C_{w_i} .

Формально проведение комплексного анализа концептов и соответствующие им адаптирующие действия (п. 2.4) можно представить в виде, показанном в таблице 1.

$\text{attr}()$, $\text{attr}()$, $\text{attr}()$ – атрибуты состоявшейся проверки, идентификатора целевой эталонной предметной области СМОО и идентификатора ссылки на эквивалентный элемент эталонной онтологии анализируемого элемента c , соответственно;

$O_{w_i}^{\text{эт}}$ – эталонная онтология предметной области СМОО, содержащая элемент o' , эквивалентный анализируемому элементу концепции c ;

$\text{synt}(O_{w_i}^{\text{эт}})$ – текстовый идентификатор целевой эталонной онтологии;

$\text{ref}(o_r)$ – ссылка на найденный эквивалентный анализируемому элемент концепции o_r ;

$T_{w_i}^k$ – не формирующая предметная область задачи, для которой не найдено соответствующей эталонной ПО в СМОО;

$T_{w_i}^*$ – формирующая предметная область задачи w_i . В результате описанных действий в исходной модели предметных областей задачи устраняется избыточность и семантическая неопределенность, что позволяет проецировать модифицированную концепцию в СМОО (п. 2.5), используя стандартные способы объединения онтологий [3, 4, 5].

Заключение

В настоящей работе предложен способ поэтапного формирования семантической модели оперативной обстановки, заключающийся в последовательной концептуализации предметных областей задач. Для концептуализации ПрО предложено сочетание методов структурной и иерархической декомпозиции критериев рассматриваемой задачи.

Проецированию концептуализированных ПрО предшествует редукция семантической модели, позволяющая устранить избыточность и семантическую неопределенность полученной совокупности концептов.

Получены формальные выражения для описания этапов метода и проведения редукции промежуточной концепции.

Направлениями дальнейших исследований является разработка на основе предложенного метода методики формирования СМОО, а также создание методики применения предложенного метода для решения практических задач управления в СУОТ.

Литература

1. Теоретические основы разработки и моделирования систем автоматизации / А.М. Афонин [и др.]. – М.: Форум, 2011. – 192 с.
2. Организация информационного взаимодействия разнородных автоматизированных систем: онтологический

подход / И.Б. Саенко [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 2. – С. 60–64.

3. Брунилин, А. А. Онтологический подход к организации информационного взаимодействия разнородных автоматизированных систем специального назначения / А.А. Брунилин, В.О. Куваев, И.Б. Саенко // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 2. – С. 69–73.

4. Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения / Б.В. Добров [и др.]. – М.: ИУИТ, 2011. – 167с.

5. Тузовский, А. Ф. Системы управления знаниями (методы и технологии) / А.Ф. Тузовский, С.В. Чириков, В.З. Ямпольский. – Томск: НТЛ, 2005. – 260 с.

6. Lefkowitz, I. Decomposition Method For Large-scale System / I. Lefkowitz, J. Schoffer // Comp. & Elect. Eng. – 1973. – No. 1. – P. 55–71.

Модель асинхронного мультиплексирования скрываемых данных в видеоконтейнере переменной емкости

Model of asynchronous multiplexing of hidden data in a variable-capacity video container

Ерунов / Erunov A.

Анатолий Александрович

(erun_to@mail.ru)

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ,

адъюнкт.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: цифровая стеганография – digital steganography; скрытые каналы – hidden channels; стегоканалы – stego-channels; асинхронное мультиплексирование – asynchronous multiplexing; переменная пропускная способность скрытого канала – variable throughput of the hidden channel.

Развитие методов сокрытия данных и расширение приложений цифровой стеганографии требует поиска компромисса между скрытностью и пропускной способностью скрытых каналов передачи данных. В данной статье обоснована актуальность исследований в направлении перераспределения пропускной способности группового скрытого канала передачи данных в видеопотоке системы спутниковой связи, представлен подход, позволяющий увеличить число скрытых каналов передачи данных в одном видеопотоке за счет асинхронного мультиплексирования.

The development of data concealment methods and the expansion of digital steganography applications requires a compromise finding between the concealment and throughput of hidden data channels. In this article, the relevance of research in the direction of redistribution of the bandwidth of the group hidden data channel in the video stream of the satellite communication system has been substantiated; an approach that allows increasing the number of hidden data transmission channels in one video stream due to asynchronous multiplexing has been presented.

Введение

В настоящее время задача защиты информации в условиях воздействия на сети связи кибератак является первостепенной. Ежегодно во всем мире простые граждане и крупнейшие корпорации несут убытки из-за нарушения конфиденциальности передаваемой информации. Наряду с криптографическими методами защиты информации одним из направлений в решении

данной задачи является применение методов цифровой стеганографии.

Основной задачей цифровой стеганографии является сокрытие передаваемых данных за счет избыточности различных видов информации, представляемой в цифровом виде и не привлекающей внимания несанкционированных наблюдателей. Информацию, в которой осуществляется скрытая передача, принято называть контейнером [1]. Значительная избыточность видеоданных в сравнении с остальными видами трафика определяет их использование в качестве контейнера для скрытой передачи информации. Основные характеристики стеганографического обмена – скрытность (в смысле сохранения в тайне факта передачи информации) и пропускная способность скрытого канала (как максимальное количество информации, которое возможно встроить в один контейнер при сохранении скрытности встраивания) находятся в противоречии друг с другом. Дополнительные ограничения на пропускную способность скрытого канала возникают из-за необходимости обеспечения требуемой достоверности приёма скрываемых данных. Зависимость скрытой пропускной способности $C_{\text{стег}}$ от скрытности U и достоверности приёма скрываемых данных $P_{\text{ош}}$ представлена на рис. 1.

Представленный в работе [2] анализ известных методов скрытой передачи информации видеоданных показал, что

1. Наибольшей скрытностью обладают методы встраивания в частотную область видеоданных до сжатия [3–8], что приводит к искажению скрываемой информации в процессе сжатия и обуславливает необходимость ее помехоустойчивого кодирования. Компромиссом, позволяющим разрешить противоречие между пропускной способностью и помехозащищенностью, является кодовое уплотнение, впервые предложенное в работах [9–11];

2. Пропускная способность скрытого канала является переменной и зависит от визуальных характери-

стик видеопотока. При этом в открытых источниках ни в одном из методов не оценивалась динамика изменения пропускной способности скрытого канала.

Одним из способов повышения пропускной способности скрытого канала является асинхронное мультиплексирование скрывааемых данных. Однако реализации асинхронного мультиплексирования скрывааемых данных без учета переменной пропускной способности скрытого канала может привести к потере пакетов скрывааемых данных и значительному ухудшению качества скрытого информационного обмена. В этой связи возникает необходимость согласования выходной скорости пакетированных данных абонентов скрытого информационного обмена с переменной скоростью их встраивания в контейнер. Принцип работы такого асинхронного мультиплексора представлен на рис. 2.

Для оценивания пропускной способности группового скрытого канала с кодовым уплотнением в работе разделены понятия канальной емкости скрытого канала и скрытой пропускной способности. Под канальной емкостью группового скрытого канала K в статье понимается потенциальные возможности видео-контейнера, определяемые, как число типовых скрытых каналов, организуемых в этом контейнере. Под скрытой пропускной

способностью $C_{стег}$ в статье подразумевается максимально достижимая скорость скрытой передачи данных в одном видео-контейнере и измеряемая в бит/с.

Результаты имитационного моделирования [12] оценивания переменной пропускной способности группового скрытого канала представлены на рисунке 3: оценена скрытая пропускная способность $C_{стег}$ (рис. 3а) и канальная емкость группового скрытого канала K (рисунок 3б). Результаты получены для значений вероятностей ошибочного приема $P_{ош}$ не хуже 10^{-3} . Ось абсцисс соответствует номерам кадров в видеопотоке и характеризует динамику видео-контейнера, ось ординат – скрытой пропускной способности $C_{стег}$ или емкости скрытого канала K (рис. 3а и рис. 3б соответственно).

На рис. 4 представлены накопленные статистические данные об изменении числа элементарных каналов и снижении скрытой пропускной способности (штриховая кривая), аппроксимированные кривой, изменяющейся по экспоненциальному закону распределения случайной величины (сплошная кривая).

Результаты проверки соответствия выбранного закона распределения случайной величины снижения пропускной способности реальному процессу по критерию Пирсона, рассчитываемого по формуле

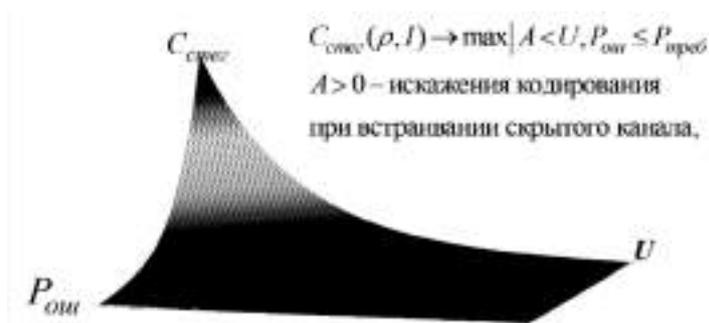


Рис.1. Определение пропускной способности скрытого канала

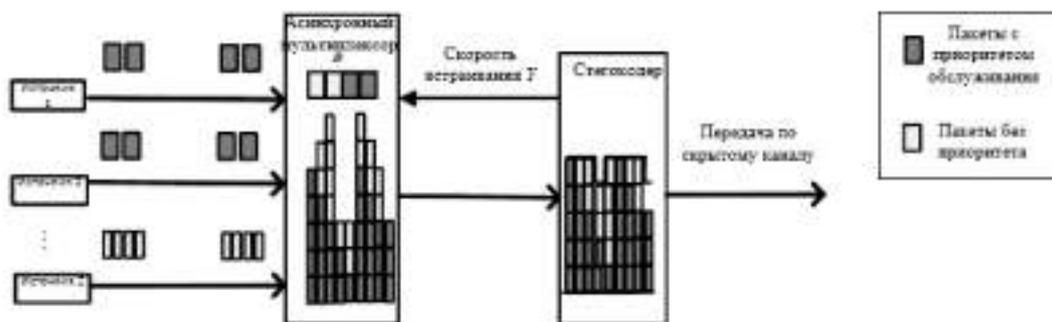
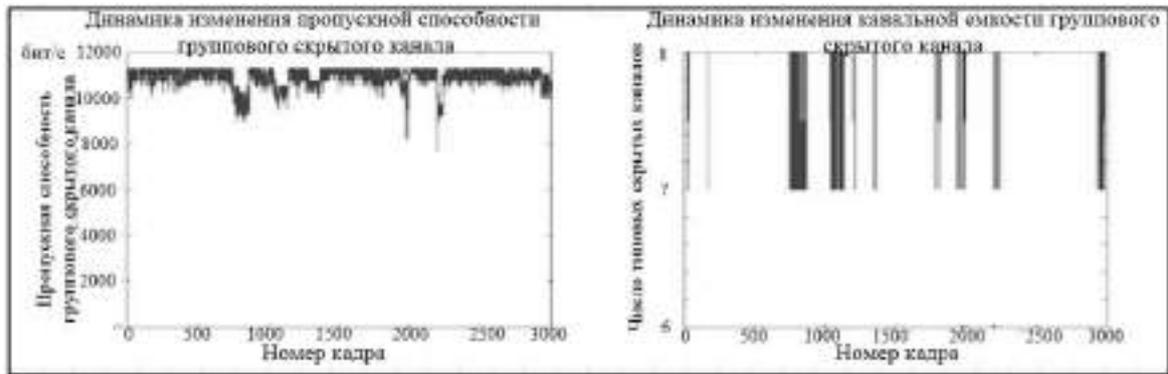


Рис. 2. Принцип работы асинхронного мультиплексора с переменной скоростью передачи



а)

б)

Рис. 3. Результаты оценивания пропускной способности скрытого канала

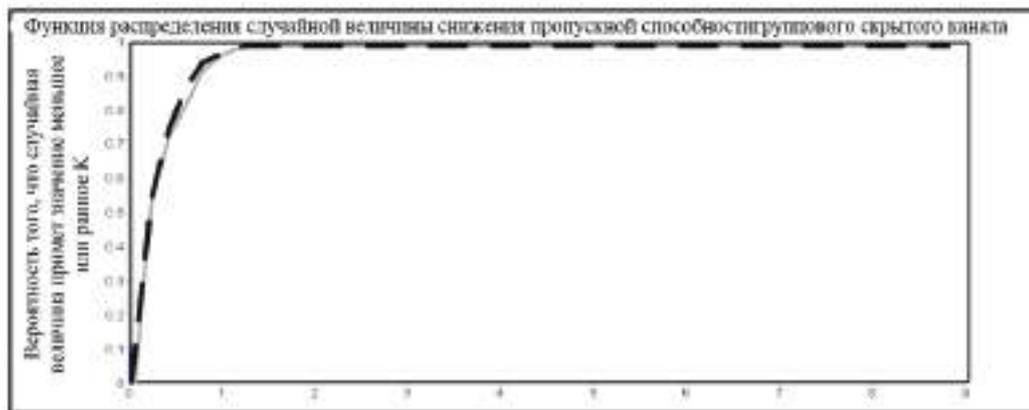


Рис. 4. Аппроксимация закона распределения случайной величины снижения пропускной способности скрытого канала

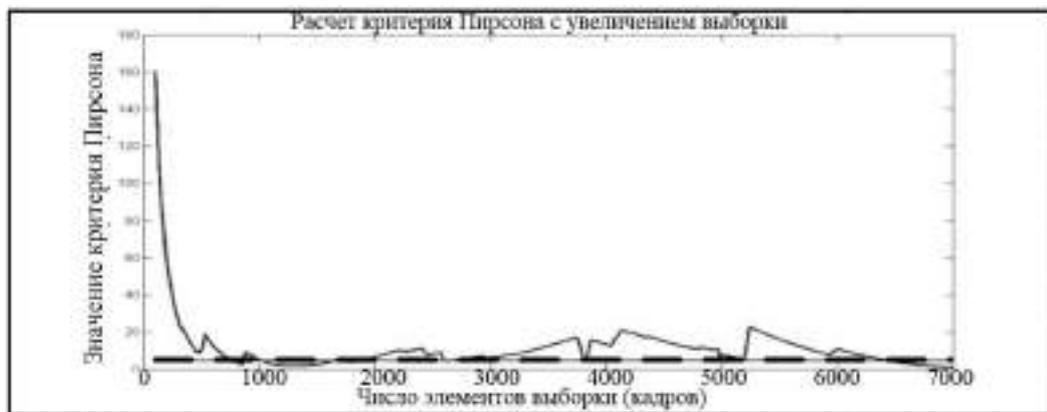


Рис. 5. Проверка выбранного закона распределения случайной величины снижения пропускной способности по критерию Пирсона

$$X_n^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(n_i / n - P_i(\theta))^2}{P_i(\theta)}$$

представлены на рис. 5. При этом штриховая линия соответствует критическому значению $\chi^2_{г.р.}$. Для данной выборки число степеней свободы $r = k - s = 7$ ($k = 8$ – число разрядов, $s = 1$ – число наложенных связей). Вероятность $p = 0,7$ и характеризует расхождение теоретического и статистического распределения и означает, что данное расхождение, обусловленное случайными причинами, будет не меньше, чем фактически наблюдаемое в данной серии опытов значение χ^2 . Полученные значения критерия Пирсона соответствуют сплошной кривой рис. 5.

Анализ представленных графиков позволяет заключить, что применение выбранного закона аппроксимации случайной величины снижения пропускной способности допустимо в модели асинхронного мультиплексирования скрывааемых данных в видеоконтейнере.

Модель асинхронного мультиплексирования скрывааемых данных с учетом их приоритета при формировании группового скрытого канала с переменной скоростью встраивания в видеопоток представлена в виде системы массового обслуживания (рис. 6). Предлагаемая модель отличается от известных учетом переменной скорости передачи скрывааемых данных, которая согласуется с текущим значением канальной емкости кадра видеоконтейнера. При применении асинхронного мультиплексирования в стегосистеме, разделяемым ресурсом между активными абонентами выступают элементы видеоконтейнера, подлежащие модификации при встраивании. Таким образом, достигается дополнительное уплотнение видеоконтейнера скрывааемыми данными. Процесс обслуживания пакетированных данных, поступающих от абонентов скрытого

информационного обмена, представлен в виде случайного марковского процесса, граф которого изображен на рис. 7. Где K – канальная емкость группового скрытого канала передачи данных;

- B – объем памяти буфера мультиплексора;
- $R = K + B$ – ресурс выделяемый для обслуживания;
- Z – количество источников пакетов;
- λ_1 – интенсивность поступления пакетов 1 приоритета;
- $\tau_1 = 1/\lambda_1$ – средний интервал времени между последовательными поступлениями пакетов 1 приоритета;
- μ_1 – интенсивность обслуживания пакетов 1 приоритета;
- λ_2 – интенсивность поступления пакетов 2 приоритета;
- $\tau_2 = 1/\lambda_2$ – средний интервал времени между последовательными поступлениями пакетов 2 приоритета;
- μ_2 – интенсивность обслуживания пакетов 2 приоритета;
- α – интенсивность активизации источников трафика;
- $\tau_n = 1/\alpha$ – средняя длительность поступления пачки пакетов во входящем трафике мультиплексора;
- β – интенсивность умолкания источников трафика;
- $b_n = 1/\beta$ – средняя длительность паузы между пачками пакетов во входящем трафике мультиплексора;
- η – интенсивность снижения пропускной способности скрытого канала;
- $\tau_k = 1/\eta$ – средняя длительность снижения пропускной способности скрытого канала;
- ν – интенсивность восстановления пропускной способности скрытого канала
- $b_k = 1/\nu$ – средняя длительность восстановления пропускной способности скрытого канала.

Для определения значений стационарных вероятностей состояний $(p_{k,z,ij})$ рассматриваемой модели

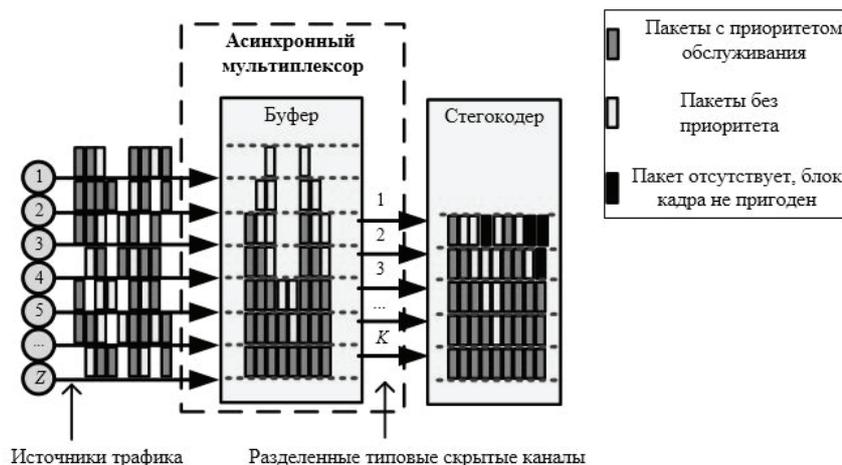


Рис. 6. Модель асинхронного мультиплексирования скрывааемых данных с учетом их приоритета при формировании группового скрытого канала с переменной скоростью встраивания в видеопоток

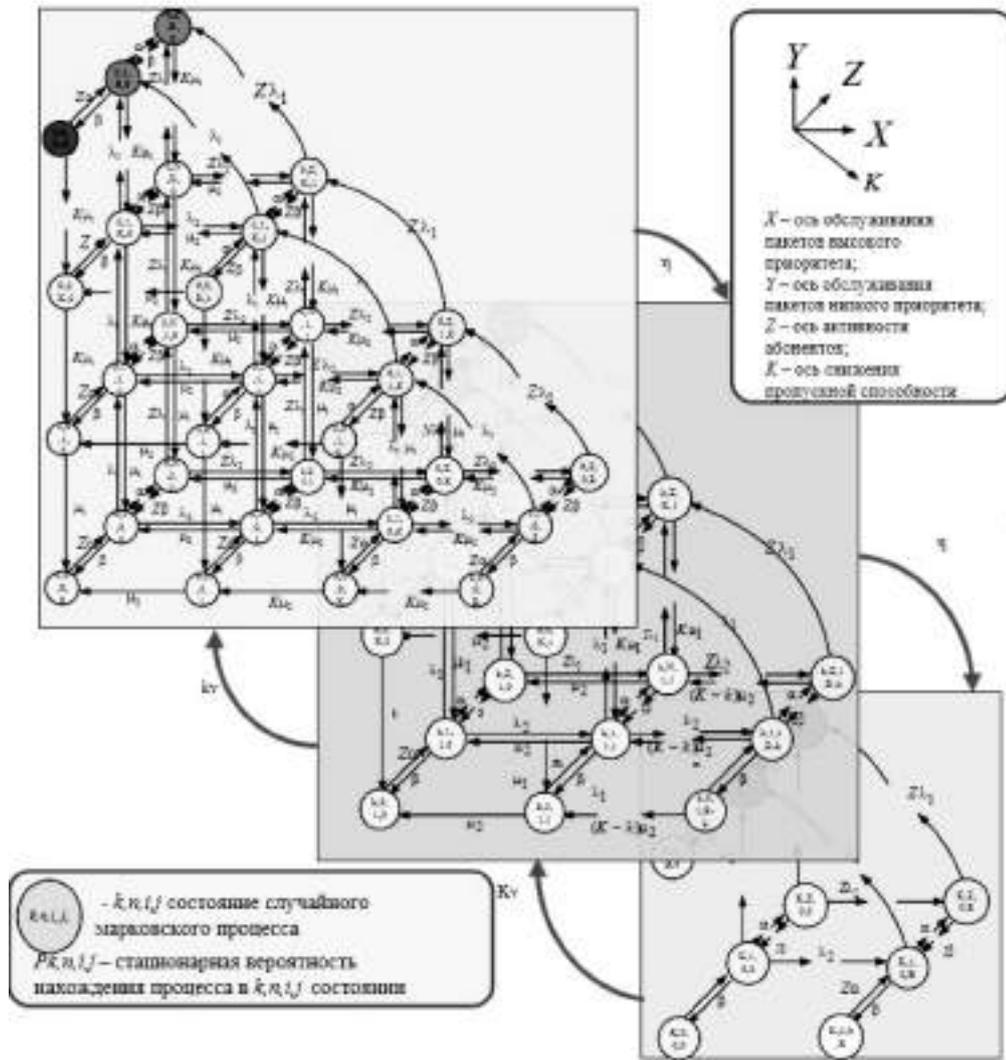


Рис. 7. Граф случайного марковского процесса обслуживания пакетированных данных в асинхронном мультиплексоре с переменной скоростью передачи данных

в соответствии с [13] может быть составлена система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases}
 (\eta + Z * \alpha) p_{0,0,0,0} = \mu_2 * p_{0,0,0,1} + \mu_1 * p_{0,0,1,0} + \\
 + \nu * p_{1,0,0,0} + \beta * p_{0,1,0,0}; \\
 (\eta + Z * \alpha + \mu_2) p_{0,0,0,1} = 2\mu_2 * p_{0,0,0,2} + \\
 + \mu_1 * p_{0,0,1,1} + \nu * p_{1,0,0,1} + \beta * p_{0,1,0,1}; \\
 \dots \\
 (K * \nu + Z * \beta) p_{K,Z,B,0} = \eta * p_{K-1,Z,B,0} + \\
 + a * p_{K,Z-1,B,0} + Z\lambda_1 * p_{K,Z,B-1,0} + \beta * p_{K,Z,B-2,0}
 \end{cases} \quad (1)$$

Дополнительным уравнением, с помощью которого определяется вероятность p_{0000} , является условие нормировки:

$$\sum_{k=0}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{i=0}^{K-k+B} \sum_{j=0}^{K-k+B-i} p_{k,z,i,j} = 1. \quad (2)$$

После расчёта стационарных вероятностей состояний исследуемой марковской цепи легко могут быть вычислены характеристики средних длин очереди пакетов разного приоритета в буфере:

$$\begin{aligned}
 \bar{q}_1 &= \sum_{k=0}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{i=K-k+1}^{K-k+B} (i-K+k) \times \sum_{j=0}^{K-k+B-i} p_{k,z,i,j}; \\
 \bar{q}_2 &= \sum_{k=0}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{i=0}^{K-k} \sum_{j=K-k-i+1}^{K-k+B-i} p_{k,z,i,j} \times (j-K+k+i);
 \end{aligned} \quad (3)$$

вероятности переполнения буфера пакетами разного приоритета:

Зависимость вероятности потери пакетов P_{Π} от интенсивности поступления пакетов λ_1, λ_2



Рис. 8. Зависимость вероятности потери пакетов от интенсивности их поступления

Зависимость времени задержки пакетов $\bar{\omega}$ от интенсивности поступления пакетов λ_1, λ_2



Рис. 9. Зависимость времени задержки пакетов в буфере от интенсивности их поступления

Зависимость вероятности потери пакетов P_{Π} от емкости буфера

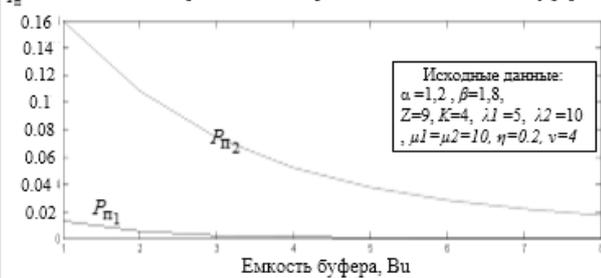


Рис. 10. Зависимость вероятности потери пакетов от емкости буфера

Зависимость времени задержки пакетов $\bar{\omega}$ от емкости буфера

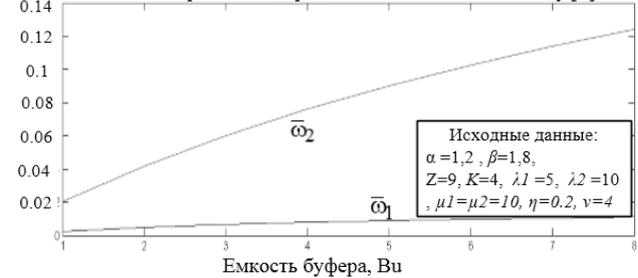


Рис. 11. Зависимость времени задержки пакетов в буфере от его емкости



Рис. 12. Зависимость допустимого числа источников трафика Z от канальной емкости группового скрытого канала K

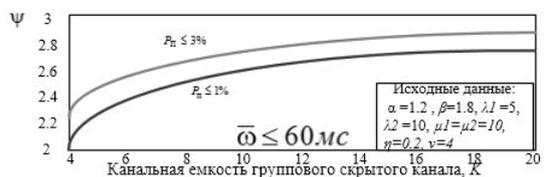
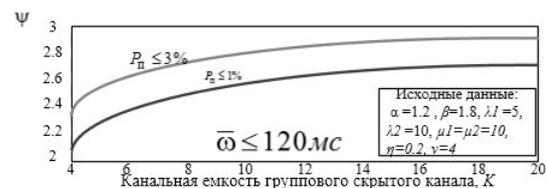


Рис. 13. Выигрыш от мультиплексирования при ограничениях на вероятность потери пакета и время задержки в буфере

$$P_{n1} = \sum_{k=0}^K \sum_{z=0}^Z p_{k,z,i,j}, i = K + B - k;$$

$$P_{n2} = \sum_{k=0}^K \sum_{z=0}^Z \sum_{i=0}^{K-k+B} p_{k,z,i,j}, j = K - k + B - i \quad (4)$$

среднего времени задержки пакетов разного приоритета в буфере:

$$\bar{\omega}_1 = \bar{q}_1 / [\lambda_1(1 - P_{n1})]; \quad \bar{\omega}_2 = \bar{q}_2 / [\lambda_2(1 - P_{n2})], \quad (5)$$

среднего времени задержки пакетов разного приоритета:

$$T_{z1} = \bar{\omega}_1 + 1/\mu_1; \quad T_{z2} = \bar{\omega}_2 + 1/\mu_2 \quad (6)$$

Данные характеристики потоков пакетов с высшим и низшим приоритетом определяют качество информационного обмена и являются ограничивающим фактором увеличения пар абонентов информационного обмена Z .

Результаты оценивания параметров мультисервисного трафика абонентов скрытого информационного обмена при асинхронном мультиплексировании с учетом переменной скоростью встраивания скрываемых данных приведены на рисунках.

Таким образом, анализ представленных зависимостей позволяет найти максимальное количество каналов Z которые можно уплотнить в скрытом канале при ограничениях на P_n и ω . Использование технологии асинхронного мультиплексирования позволяет в зависимости от требуемого качества обслуживания, увеличить число организуемых типовых каналов в групповом скрытом канале по сравнению с технологией кодового уплотнения скрытого канала до 2.8 раз.

Литература

1. Грибунин, В. Г. Цифровая стеганография / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 272 с.
2. Абазина, Е. С. Сравнительный анализ и классификация методов цифровой и компьютерной стеганографии и перспективные направления ее развития / Е.С. Абазина, А.А. Ерунов / Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 655. – С. 5–16.
3. Koch, E. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling / E. Koch, J. Zhao // IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. – 1995. – P. 123–132.
4. Fridrich, J. Combining low-frequency and spread spectrum watermarking / J. Fridrich // Proceedings of the SPIE Conference on Mathematics of Data/Image Coding, Compression and Encryption. – 1998. – Vol. 3456. – P. 2–12.
5. Жгун, А. В. Модель скрытой передачи информации в каналах связи : дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 / А.В. Жгун. – В. Новгород: НовГУ, 2003. – 187 с.
6. Небаева, К. А. Разработка необнаруживаемых стегосистем для каналов с шумом : дисс. ... канд.тех.наук : 05.12.13 / К.А. Небаева. – СПб.: СПбГУТ, 2014. – 176 с.

7. Цветков, К. Ю. Методы цифровой стеганографии и их приложения в сетях спутниковой связи / К.Ю. Цветков // Сборник трудов II ВНК Космических войск. Т. 2. – СПб.: МО РФ, 2004. – С. 344–349.

8. Коровин, В. М. Метод и алгоритмы встраивания широкополосных цифровых водяных знаков в сжатые изображения / В.М. Коровин // Сборник докладов международной НПК «Особенности развития космической отрасли России и перспективы ее дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей». – СПб.: БГТУ, 2007. – С. 175–178.

9. Абазина, Е. С. Метод кодового уплотнения скрытого канала при передаче видеоданных / Е.С. Абазина // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 3. – С. 14–42.

10. Пат. 2616869, Российская Федерация, МПК H04L 9/00. Способ скрытой передачи информации с кодовым уплотнением / К.Ю. Цветков [и др.]; патентообладатель ФГКВУ ВПО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ. – № 2015113684/08; заявл. 13.04.15.

11. Абазина, Е. С. Результаты моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных / Е.С. Абазина, А.А. Ерунов // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 2. – С. 1–25.

12. Ерунов, А. А., Цветков К.Ю., Абазина Е.С. Имитационная модель скрытого канала с кодовым уплотнением и переменной емкостью видео-контейнера / А.А. Ерунов, К.Ю. Цветков, Е.С. Абазина // «Хроники Объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2017. – № 3 (94). – С. 23.

13. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания: учебник / Л. Клейнрок ; пер. И.И. Глушко ; ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

Методика применения аппаратуры потребителей космических навигационных систем для автономного определения азимутов с требуемой точностью

Technique of using the equipment of space navigation systems users for autonomous determination of azimuths with the required accuracy

Чернов / Chernov I.

Иван Владимирович

(4ern86@bk.ru)

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ,

адъютнт.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: азимут – azimuth; автономное ориентирование – autonomous orientation; высокоточное ориентирование – high-precision orientation; оперативное ориентирование – operational orientation; относительный метод – relative method; метод ориентирования – orientation method; космические навигационные системы – space navigation systems.

В статье рассматривается методика определения геодезического азимута направлений по результатам обработки спутниковых измерений. Доказывается, что в локальном районе возможно высокоточное определение азимута без использования исходной геодезической основы. Изложены основные положения предлагаемой методики и результаты исследований, которые показывают, что относительный метод космической геодезии способен обеспечить высокоточные азимутальные определения.

The method of determining the geodetic azimuth of directions based on the results of processing satellite measurements is considered in the article. It has been proved that in the local area a high-precision definition of azimuth is possible without using the initial geodetic base. The main provisions of the proposed methodology and the results of studies have been presented, which show that the relative method of space geodesy is able to provide high-precision azimuthal determinations.

Расчёт длины ориентируемого направления для достижения требуемой точности ориентирования

Идея метода определения азимута с применением аппаратуры потребителей космических навигационных систем (АП КНС) состоит в решении обратной геодезической задачи по приращениям координат пунктов, полу-

ченных относительным методом космической геодезии.

При реализации относительного метода космической геодезии не менее чем на двух пунктах производятся синхронные измерения псевдодальностей до наблюдаемых спутников. По полученным данным вычисляются разности пространственных прямоугольных координат ΔX , ΔY , ΔZ этих пунктов, которые в дальнейшем считаются измеренными величинами. Разности координат получаются в общеземной системе координат.

Чтобы вычислить геодезические азимуты, по координатам пункта B, L, H' с измеренными разностями координат ΔX , ΔY , ΔZ вычисляются координаты B, L других пунктов, закрепляющих определяемые направления. И только теперь из решения обратной геодезической задачи по полученным координатам пунктов вычисляются геодезические азимуты направлений. Для нахождения геодезического азимута переходят от пространственной геоцентрической системы координат к топоцентрической горизонтной Y', X', Z' . Тогда геодезический азимут A можно вычислить из уравнения [1]

$$A = \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta Y'}{\Delta X'} \right) \quad (1)$$

где $\Delta Y'$, $\Delta X'$ – приращения в топоцентрической горизонтной системе координат.

Будем полагать, что аргументы формулы (1) независимы. Тогда, используя уравнение средней квадратической ошибки функции независимых аргументов [2], получим выражение средней квадратической ошибки (СКО) вычисления азимута

$$m_A^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta X} \right)^2 m_{\Delta X}^2 \rho^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta Y} \right)^2 m_{\Delta Y}^2 \rho^2,$$

где m_A – СКО определения азимута; $m_{\Delta X}$, $m_{\Delta Y}$ – СКО определения приращений координат; ρ – количество

секунд в радиане (206265). Найдём частные производные этого уравнения

$$\frac{\partial A}{\partial \Delta X} = \frac{-\Delta Y}{\Delta X^2 + \Delta Y^2},$$

$$\frac{\partial A}{\partial \Delta Y} = \frac{\Delta X}{\Delta X^2 + \Delta Y^2}.$$

После подстановки частных производных в исходную формулу получим:

$$m_A^2 = \left(\frac{-\Delta Y}{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \right)^2 m_{\Delta X}^2 \rho^2 + \left(\frac{\Delta X}{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \right)^2 m_{\Delta Y}^2 \rho^2. \quad (2)$$

Пусть СКО определения приращений по осям абсцисс и ординат равны m_{Δ} , тогда уравнение (2) примет вид

$$m_A^2 = m_{\Delta}^2 \rho^2 \frac{\Delta X^2 + \Delta Y^2}{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)^2}.$$

После очевидных упрощений получим

$$m_A^2 = \frac{m_{\Delta}^2 \rho^2}{\Delta X^2 + \Delta Y^2}.$$

В знаменателе данного уравнения квадрат длины ориентируемого направления D , приведённой на плоскость горизонта. Следовательно,

$$m_A = \frac{m_{\Delta} \rho}{D}. \quad (3)$$

Учитывая, что точность определения приращений координат современной АП КНС составляет порядка $2 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} \cdot \text{Дкм}$ и используя формулу (3), возможно априорно рассчитать СКО определения геодезического азимута в зависимости от длины ориентируемого направления. Результаты расчётов приведены на рис. 1.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение относительного метода космической геодезии без использования опорных точек (наземной исходной геодезической основы) позволяет определять геодезические азимуты с СКО $0,5-0,3''$ при длине ориентируемого направления порядка $1000-2000 \text{ м}$. Теперь рассмотрим задачу выбора ориентируемых направлений.

Выбор азимута ориентируемого направления для достижения требуемой точности

Чтобы повысить точность и оперативность рассматриваемого метода, примем гипотезу о равном влиянии в один и тот же момент времени различных источников ошибок на результаты измерений для любого приемника в локальном районе ($10-30 \text{ км}$) [3]. Тогда в общем случае, когда зенитное расстояние ориентируемого направления не будет равно 90° , будет иметься зависимость ошибки ориентировки δA направления от погрешностей определения геодезических координат ΔB и ΔL . Эта зависимость описывается уравнением [1]

$$\delta A = (\Delta B \sin A - \Delta L \cos A \cos B) \operatorname{ctg} z, \quad (4)$$

где z – зенитное расстояние ориентируемого направления; B, L – геодезические широта и долгота пункта с которого определяется азимут.

Из (4) видно, что δA также зависит от азимута, угла наклона ориентируемого направления и широты. Из формулы (4) видно, что даже при погрешностях, в линейной мере достигающих 15 м , разница (δA) между любыми азимутами из множества полученных векторов, не превысит $0,1$ угловой секунды при углах наклона ориентируемого направления менее 5° . Кроме того, на широте г. Москвы при ориентировке направления, близкой к $\pi/3 + \pi l$, величина $\delta A \approx 0$. Для определения условия выбора направления на произвольной широте приравняем выражение (4) к нулю

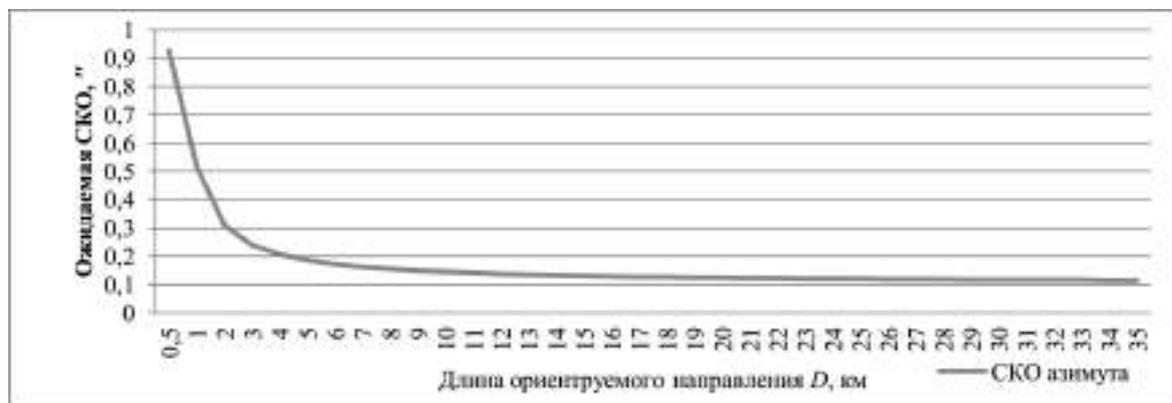


Рис. 1. Ожидаемые СКО определения геодезических азимутов в зависимости от расстояния D между точками установки антенн АП КНС, приведенного на плоскость горизонта

$$(\Delta B \sin A - \Delta L \cos A \cos B) \operatorname{ctg} z = 0,$$

$$\Delta B \sin A - \Delta L \cos A \cos B = 0,$$

приняв $\Delta B = \Delta L$ получим

$$\sin A - \cos A \cos B = 0$$

или

$$\sin A = \cos A \cos B.$$

Разделим обе части равенства на $\cos A$

$$\operatorname{tg} A = \cos B;$$

$$A = \operatorname{arctg}(\cos B) + \pi n. \quad (5)$$

Полученное выражение является правилом выбора направления на произвольной широте при определении азимутов направлений с применением АП КНС без использования исходной геодезической основы при условии $\Delta B = \Delta L$. случае $\Delta B \neq \Delta L$ выражение (5) примет вид

$$A = \operatorname{arctg}\left(\left(\frac{\Delta L}{\Delta B}\right)\cos B\right) + \pi n. \quad (6)$$

Пусть с помощью АП КНС будут получены координаты с точностью 0,1 м. Приняв доверительный интервал 2,5 м получим, что с вероятностью 0,98 $\Delta L \in [-0,25; 0,25]$, $\Delta B \in [-0,25; 0,25]$. В этом случае $\max_{\Delta L/\Delta B} \rightarrow \infty$, что не позволит определить правило выбора направления на произвольной широте при определении азимутов направлений с применением АП КНС без использования исходной геодезической основы. Тогда, внося в ΔL и ΔB равные ошибки, которые значительно (на порядок) превысят значения самих ΔL и ΔB , получим $\Delta L \in [9,75; 10,25]$, $\Delta B \in [9,75; 10,25]$. В этом случае $\max_{\Delta L/\Delta B} \approx 1,05$. Результаты расчётов по формуле (5) и (6) приведены на рис. 2.

Из результатов расчёта азимутов нулевых δA (рис. 2) можно сделать вывод, что для исключения азимутальных искажений при автономном определении высокоточного азимута с применением АП КНС необходимо проектировать геодезическую сеть исходя из правила $A = \operatorname{arctg}(\cos B) + \pi n$.

Таким образом, в случае высокоточного ориентирования и превышения угла наклона ориентируемого направления на величину 5° и более (ориентирование в горной местности) необходимо учитывать δA . При использовании предлагаемого метода ориентирования учёт δA невозможен, так как не используется геодезическая основа, необходимая для расчёта величин ΔB и ΔL геодезических координат. Однако появляется возможность компенсировать δA выбором направления близкого к $A = \operatorname{arctg}(\cos B) + \pi n$. В данном случае ориентируемое направление будет практически полностью избавлено от влияния систематических ошибок ориентирования, связанных с отсутствием исходной геодезической основы. В дальнейшем от этого направления методом измерения углов способом «во всех комбинациях» или направлений способом «круговых приёмов» геодезический азимут может передаваться с начального на любое направление.

Расчёт времени наблюдений аппаратурой потребителей космических навигационных систем для достижения требуемой точности позиционирования и ориентирования

Для получения координат при развитии геодезических сетей относительным методом космической геодезии разрешаются фазовые неоднозначности. Разрешением неоднозначности называется определение полного числа циклов несущей (длин волн) между антенной и спутником (поиск целого значения числа длин волн). Для измерений в режиме с постобработкой (PP), который используется для определения местоположения с точностью на уровне сантиметра, это целое значение определяется во время обработки на компьютере. Для измерений в реальном

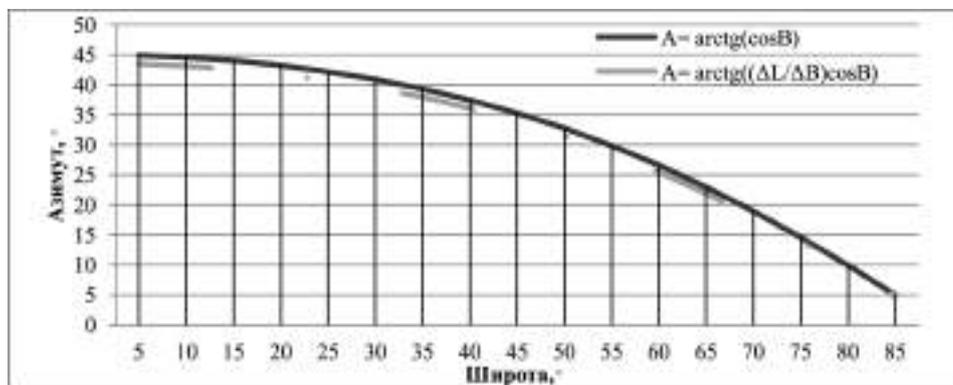


Рис. 2. Результаты расчёта азимутов нулевых δA для угла наклона ориентируемого направления, равного 5°

времени, которые используются для определения местоположения с точностью на уровне сантиметра, это целое значение определяется в течение процесса называемого инициализацией. Время разрешения фазовых неоднозначностей t_0 для современных спутниковых геодезических приёмников (АП КНС) составляет от 5 секунд до 10 минут [4].

После разрешения фазовых неоднозначностей АП КНС получает решение навигационной задачи (фазовым методом) с интервалом от одной секунды и более (интервалы менее 1 секунды получаются путём интерполяции между односекундными наблюдениями).

Точность получения координат (в абсолютном режиме позиционирования) для АП КНС обусловлена [5–7]:

- погрешностями космического сегмента, связанные с погрешностями эфемерид спутников и частотно-временных поправок, бортовой аппаратуры, обеспечивающей формирование и излучение навигационного сигнала;
- погрешностями, связанными с распространением сигнала в ионосфере и тропосфере Земли, а также с условиями приема сигналов в наземной аппаратуре (эффект многолучевости);
- погрешностями аппаратуры спутниковой навигации (навигационной аппаратуры потребителя).

Погрешности будут иметь различные статистические свойства. Например, первая группа погрешностей будет изменяться медленно. С другой стороны, погрешности АП КНС изменяются намного быстрее (несколько раз в секунду). Если рассмотреть достаточное количество различных навигационных сценариев в течение длительного периода и предположить, что все составляющие погрешностей являются некоррелированными между собой случайными величинами с нормальным законом распределения, тогда дисперсия общей погрешности определится, как сумма дисперсий отдельных составляющих [5–7].

Определенные выше погрешности принято пересчитывать в пользовательскую эквивалентную ошибку дальности UERE (User Equivalent Range Error). Отдельные составляющие общей погрешности, которую принято называть бюджетом погрешностей, приведены в таблице 1 [7, 8].

Приводимые в таблице 1 значения отдельных составляющих соответствуют остаточным значениям погрешностей, т.е. предполагается, что в приемнике приняты меры по снижению погрешностей определения псевдодальности. Погрешности, вносимые приемником, соответствуют автономно работающему неподвижному приемнику с двухэтапной обработкой сигналов при приеме сигнала от навигационного спутника, находящегося в зените. Учитывая данный комментарий, величина результирующей погрешности в таблице 1 имеет смысл потенциально (предельно) достижимой в реальной АП КНС.

В случаях положения НС отличного от зенита точность определения пространственных координат потребителя снижается. Снижение точности определяется геометрическим фактором ухудшения точности по вектору положения (PDOP (position dilution of precision)): Отношение трехмерной погрешности определения местоположения в точке нахождения навигационной аппаратуры потребителя к погрешности измерения псевдодальности [5, 6]. Среднее квадратическое отклонение (СКО) положения пункта рассчитывается по формуле [6]

$$m_R = UERE \cdot PDOP. \quad (7)$$

Характеристики стандартной орбитальной конфигурации навигационных спутников (НС) в ГЛОНАСС таковы, что они с вероятностью 99,9% и более обеспечивают в глобальной рабочей зоне видимость в любом 24 часовом интервале четырех и более спутников, при этом четыре спутника обеспечивают $PDOP \leq 6$ (в случае использования угла маски, равного 5°). Опираясь на данные

Таблица 1

Бюджет эквивалентных погрешностей определения псевдодальности

Источник погрешности	СКО для одночастотной АП КНС, м	СКО для двухчастотной АП КНС, м
Эфемериды	2,6–2,0	2,6–2,0
Часы спутника	2,0–3,0	2,0–3,0
Ионосфера	4,0–2,3	≤ 2
Тропосфера	0,5–0,4	0,5–0,4
Многопутность	2,5–1,2	2,5–1,2
Приемник	1,5–0,5	1,5–0,5
Прочие	2,0–1,5	2,0–1,5
Пользовательская эквивалентная ошибка дальности (UERE)	6,2–4,7	5,2–4,6

российской системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) территория России обеспечивается доступностью ГЛОНАСС с PDOP в среднем до двух единиц (данные с сайта: <http://www.sdcм.ru/smglo>, обращение к ресурсу СДКМ от 22.01.2017г). Т.е. для двухчастотной аппаратуры априорное СКО определения следует принять $m_R=10,4...9,2$ м.

Погрешность Δ будет включать \triangle случайную и δ систематическую составляющую. Пусть положение АП КНС относительно Земли постоянно, а величиной δ можно пренебречь. Тогда, случайная ошибка вычисления усреднённых координат будет компенсироваться [1]. В случае нормального закона распределения ошибки \triangle математическое ожидание M случайной величины R совпадает с её средним арифметическим [2]

$$M(R) = \bar{R} = \frac{[R]}{N}, \tag{8}$$

здесь R – вектор положения. Приняв, что СКО определения координат в абсолютном режиме позиционирования для АП КНС составит $m_{Ri}=9,8$ м, получим СКО среднего арифметического R (8) по формуле [2]

$$m_{\bar{R}} = \frac{m_{Ri}}{\sqrt{N}}. \tag{9}$$

Визуализация приведённой зависимости представлена на рис. 3.

Используя зависимость (9), не сложно записать формулу времени, потребного для достижения заданной СКО определения координат

$$T = t_0 + tN, N = \left(\frac{m_{Ri}}{m_{\bar{R}}} \right)^2, \tag{10}$$

где T – время потребное для достижения заданного СКО определения координат, t – время одного решения навигационной задачи $t = t_i - t_{i-1}$; t_0 – время разрешения фазовых неоднозначностей.

В соответствии с ГОСТ 32454–2013 погрешность местоопределения рассчитывается в 95% времени наблюдений. Соответственно для компенсации потенциально отбракованных наблюдений необходимо увеличить время потребное для достижения заданного СКО определения координат минимум на 5%, тогда формула (10) примет вид

$$T = t_0 + tN + 0,05tN, N = \left(\frac{m_{Ri}}{m_{\bar{R}}} \right)^2, \tag{11}$$

Наименьший интервал решения навигационной задачи t составляет одну секунду. Исходя из формулы (11), время наблюдений для достижения требуемой точности определения координат составит: 12 мин – 1 м; 17 мин – 0,5 м, 3 ч – 0,5 м.

В приведённых расчётах не учитываются систематические составляющие ошибок измерения псевдодалности ($UERE$). Для повышения точности определений в указанных условиях целесообразно для повышения точности местоопределения применить функциональные дополнения.

Поскольку с накоплением количества измерений уточняются координаты пунктов, будут уточнены и их разности, т.е. приращения координат, применение усреднения координат и приращений позволяет решить задачу высокоточной привязки неподвижного объекта на суточном интервале наблюдений и решить задачу высокоточного определения азимута без использования исходной наземной геодезической основы, т.е. автономно.

Методика применения аппаратуры потребителей космических навигационных систем для автономного определения азимутов с требуемой точностью

Основываясь на изложенном выше можно представить методику применения АП КНС для автономного определения азимутов с требуемой точностью (рис. 4).

Первый шаг методики – «Расчёт длины ориентируемого направления для достижения требуемой точности ориен-

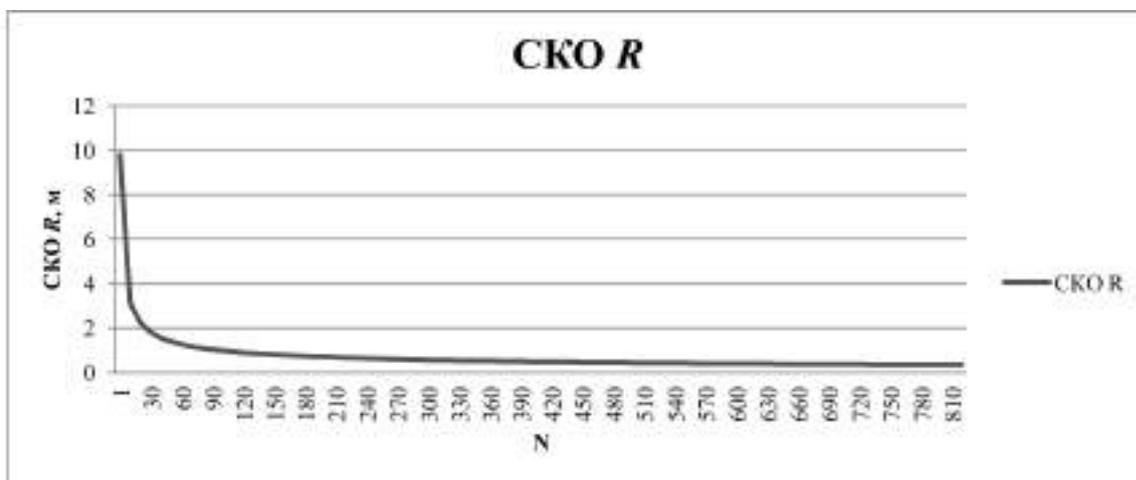


Рис. 3. Ожидаемые СКО вектора положения



Рис. 4. Методика применения АП КНС для автономного определения азимуты с требуемой точностью

тирования». Зная требуемую СКО определения азимута m_{Δ} и точность определения приращений координат m_{Δ} , по формуле (3) рассчитывается расстояние (базовая линия) на которую необходимо разнести антенны АП КНС.

Следующий шаг – «Выбор азимута ориентируемого направления для снижения влияния ошибки определения координат». Зная широту места установки АП КНС, по формуле (5) рассчитывается азимут, с которым должно совпадать ориентируемое направление.

Третьим шагом является «Расчёт времени наблюдений АП КНС для достижения требуемой точности позиционирования и ориентирования». Для расчётов используется формула (11).

Наблюдения с применением АП КНС выполняются в соответствии с руководством пользователя, но при соблюдении обязательного условия – наблюдения на пунктах ориентируемого направления должны быть одновременными.

Обработка результатов измерений выполняется в заключение методики. Выполняется расчёт координат пункта, с которого определяется азимут в соответствии с абсолютным методом позиционирования.

Полученные координаты используются как исходные для определения координат относительным методом космической геодезии. С использованием полученных координат рассчитываются азимут и зенитное расстояние направления.

После решения ОГЗ оценивается зенитное расстояние z ориентируемого направления. В случае, когда z превышает 5° , обе координаты обоих пунктов изменяются на равную величину (на порядок превосходящую точность получения координат) и ОГЗ решается ещё раз. Второе решение принимается итоговым.

Предложенная методика позволит применять АП КНС для автономного определения азимутов с требуемой точностью, за счёт установки правил проектирования положения по зенитному расстоянию, азимуту и длине ориентируемого направления, также позволит определить необходимое время наблюдений.

Литература

1. Чернов, И. В. Определение азимутов с применением относительного метода космической геодезии без использования исходной геодезической основы / И.В. Чернов, В.Ф. Алексеев, А.И. Яковлев // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 103–107.
2. Русяева, Е. А. Теория математической обработки геодезических измерений: Часть I. Теория ошибок измерений / Е.А. Русяева. – М.: МИИГАиК, 2016. – 56 с.
3. Глушков, В. В. Космическая геодезия: методы и перспективы развития / В.В. Глушков, К.К. Насретдинов, А.А. Шаравин. – М.: ИПВА, 2002. – 448 с.
4. Руководство по эксплуатации. GNSS-приемник спутниковый геодезический ТРИУМФ-1-G3T. ДРША.464345.001 РЭ. Версия 1.3. – М.: Джи Эн Эс Эс, 2014. – 70 с.
5. Мальцев, Г. Н. Потенциальная точность привязки подвижных измерительных пунктов по сигналам спутни-

ковой навигационной системы ГЛОНАСС / Г.Н. Мальцев, А.Н. Сакулин, Е.А. Сакулин // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. – 2015. – № 2. – С. 57–64.

6. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К.М. Антонович. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 2 т.

7. Тяпкин, В. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография / В. Н. Тяпкин, Е. Н. Гарин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 260 с.

Формирование вектора признаков пользователя по динамике рукописного почерка

Formation of the vector of user characteristics by the dynamics of handwriting

Дикий / Dikiy D.

Дмитрий Игоревич

(dimandikiy@mail.ru)

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО), инженер кафедры ПБКС.

г. Санкт-Петербург

Артемьева / Artemeva V.

Виктория Денисовна

(vika_med2019@mail.ru)

БФУ «Балтийский федеральный университет им.

Иммануила Канта»,

студент.

г. Калининград

Одноворченко / Odnovorchenko P.

Павел Владимирович

(odn-pav@yandex.ru)

Университет ИТМО,
инженер кафедры СТО.

г. Санкт-Петербург

Карманова / Karmanova N.

Наталья Андреевна

(natali.karmanova@gmail.com)

Университет ИТМО,
лаборант кафедры ГИС.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: биометрия – biometrics; алгоритм – algorithm; аутентификация – authentication; динамика рукописного ввода – handwriting input dynamics; пароль – password; вектор признаков – vector signs.

Статья посвящена исследованию предлагаемого алгоритма, применяемого в системах аутентификации пользователей различных информационных систем по динамике рукописного почерка. Основной задачей алгоритма является формирование вектора признаков определенной длины путем извлечения из полного ряда декартовых координат траектории, полученных с устройства ввода, только тех, которые несут наибольшую информативную значимость.

The article is devoted to the investigation of the proposed algorithm used in systems of user authentication of various information systems on the dynamics of handwriting. The main task of the algorithm is the formation of a vector of characteristics of a certain length by extracting from the complete Cartesian coordinates of the trajectory obtained from the input device, only those that bear the greatest information importance.

Введение

Согласно данным аналитического центра InfoWatch за 2015 год, 90% утечек были связаны с компрометацией персональных данных. За этот период были украдены более 950 миллионов записей, в том числе содержащих платежную информацию, обладание которой может привести к финансовым потерям [1]. Поэтому

следует уделять огромное внимание угрозам, свойственным удаленному несанкционированному доступу. Удаленный доступ к данным, как правило, реализуется через глобальную сеть Интернет, где каждому пользователю предоставляется уникальная идентифицирующая его информация. Компрометация такой информации позволяет злоумышленнику получить доступ к конфиденциальной информации, например адрес электронной почты, адрес проживания, номер телефона, а в некоторых случаях платежная информация. На сегодняшний день пароли при достаточной их длине и мощности алфавита и цифр могут стать непреодолимой преградой на пути злоумышленника. Однако их главным минусом является то, что пароль все-таки мог быть подобран или выведен. Следующим этапом развития систем аутентификации стало использование многофакторной аутентификации. Сейчас широко распространены технологии краткосрочного, временного пароля, высылаемого на мобильный номер телефона пользователя (хотя пользователь может быть недоступен). Другим подходом к решению данной проблемы является применение биометрической аутентификации. В качестве атрибута доступа в таких системах применяется биометрический признак человека, например, отпечаток пальца, рисунок радужной оболочки глаза, динамика подписи.

Издавна человек использовал свою рукописную подпись в качестве доказательства того, что именно он совершил некое действие, например заключение договора. И действительно, визуально сравнивая два образца подписи, можно с некоторой уверенностью

сказать, были ли они сделаны одним и тем же человеком. Однако кроме визуального сравнения изображений, можно анализировать динамические параметры написания некоторого парольного слова для идентификации человека.

Цель работы

Целью настоящей работы является исследование алгоритма, формирующего вектор признаков динамики написания некоего парольного слова или фразы определенной длины. Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- реализовать алгоритм;
- исследовать характеристики алгоритма;
- провести анализ предлагаемого алгоритма.

Обзор

В настоящее время аутентификация человека по характеристикам почерка является сложной задачей. Во-первых, стоит определиться с тем, что считать за биометрические признаки почерка, подходящие для анализа. Наиболее современные продукты российских и зарубежных производителей можно разделить на два вида: статические и динамические. Статические – это такие системы, которые работают с уже полученным изображением образца почерка человека. К сожалению, этот подход не применим к аутентификации при удаленном доступе к информационной системе в режиме онлайн. Наоборот, динамические системы оценивают почерк в момент написания текста. Чаще всего динамические системы требуют широкого функционала устройств ввода: способность снимать точные координаты траектории $x(t)$, $y(t)$, оценивать силу нажатия $z(t)$ и угол наклона $\theta(t)$, скорость написания текста $dx(t)/dt$, $dy(t)/dt$ и другие характеристики. Такие системы имеют явные преимущества, однако их главным недостатком является зависимость от частоты обработки сигнала от устройства ввода.

Среди алгоритмов, работающих с динамическими параметрами, наиболее широко распространены следующие методы и их комбинации: дискретное вейвлет преобразование, представляющее собой разложение на высокочастотную и низкочастотную составляющие сигнала [2]; алгоритм динамической трансформации временной шкалы, заключающийся в смещении оси времени так, чтобы минимизировать разницу расстояний между сигналами [3]; скрытые Марковские модели, являющиеся статистическими моделями предсказания неизвестных переменных по известным данным [4]; спектральный анализ с помощью дискретного преобразования Фурье, производящий определение наиболее информативных гармоник [5]; детектирование экстремальных точек – алгоритм определения минимумов и максимумов сигналов для дальнейшей обработки участков между ними [6]. Искусственные нейронные сети и другие алгоритмы классификации и машинного обучения позволяют организовать процедуру разделения на классы «свой-чужой». Большинство из них рассмотренных алгоритмов работают с векторами признаков определенной длины.

Ввиду того, что многие устройства ввода не способны фиксировать давление на поверхность и угол наклона пера, то в качестве вектора признаков будет рассматриваться набор средних скоростей перемещения пера между соседними точками траектории.

Алгоритм

Алгоритм формирования вектора признаков основан на том, что каждая траектория описывается последовательностью точек, имеющих декартовы координаты. При предъявлении нескольких образцов от пользователя парольного слова, траектории не должны сильно отличаться.

Основная задача, стоящая перед алгоритмом, – сформировать вектор признаков определенной длины, который наиболее точно описывает процесс написания траектории. Чувствительность алгоритма к детектированию информативности элементов траектории характеризуется значением коэффициента max . Этот коэффициент определяет максимальное расстояние, вычисляемое по формуле (1), от точки до прямой, проведенной через соседние точки, при котором участок траектории будет считаться прямолинейным. При значении max равно нулю фиксируется любое отклонение траектории от прямой, в частности вызванное дрожанием руки. Повторить малейшие изменения траектории не представляется возможным, что приводит к увеличению вероятности ошибки I-го рода. Однако при значениях коэффициента, сопоставимых с размерами парольного слова, сокращается объем данных, описывающих траекторию, что приводит к потере информации. Это способствует увеличению вероятности ошибки II-го рода. Ниже приведен рассматриваемый алгоритм:

- 1) инициализация вспомогательных массивов n , m , индекс $i=1$;
- 2) установка значения коэффициента max ;
- 3) запись координат x_i и y_i в массив n ;
- 4) по координатам первой и последней точек, входящих в массив n , рассчитываются параметры прямой по уравнению, согласно формуле (2), и вычисляется расстояние от каждой точки j вспомогательного массива до этой прямой по формуле (1);

$$d_j = \frac{|(y_k - y_n) * x_j + (x_n - x_k) * y_n + x_n * (y_n - y_k) + y_n * (x_k - x_n)|}{\sqrt{(y_k - y_n)^2 + (x_k - x_n)^2}} \quad (1)$$

$$\frac{x - x_n}{x_k - x_n} = \frac{y - y_n}{y_k - y_n} \quad (2)$$

где d_j – расстояние от j -ой точки вспомогательного массива с координатами x_j , y_j до прямой, построенной по координатам первой (x_n, y_n) и последней точки (x_k, y_k) массива n .

- 5) если расстояние d_j меньше значения коэффициента max , то переход к шагу 6, иначе – к шагу 7;

- 6) $i=i+1$, переход к шагу 3;

7) если расстояние от точки d_j больше max , то j -ая точка записывается в массив m , индекс $i = j$, все элементы массива n удаляются, переход к шагу 3;

8) если в процессе выполнения алгоритма имеется несколько точек массива, удовлетворяющих условию шага 7, то отбирается точка, имеющая наибольшее отклонение от прямой (d_j);

9) когда алгоритм доходит до последней точки траектории, ее координаты сохраняются в массив m , переход к шагу 10.

По окончании работы шага 9 в сформированном массиве m хранятся декартовы координаты только тех точек, которые соответствуют условиям алгоритма. Отбор данных производится за счет исключения точек, наименее удаленных от прямых, проведенных через соседние точки. В том числе удаляются точки, последовательно лежащие на одной прямой.

10) Расчет значения средней горизонтальной и вертикальной составляющих скорости перемещения пера между соседними точками, хранящимися в массиве m , по формуле (3):

$$vx_s = \frac{x_{s+1} - x_s}{t_{s+1} - t_s}; vy_s = \frac{y_{s+1} - y_s}{t_{s+1} - t_s} \quad (3)$$

где vx_s и vy_s — горизонтальный и вертикальный компоненты скорости перемещения пера между точками с координатами (x_s, y_s) и (x_{s+1}, y_{s+1}) массива m ; t_s — время регистрации сообщения от устройства ввода о том, что перо находится в точке с координатами (x_s, y_s) .

Таким образом, алгоритм позволяет по данным исходной траектории сформировать вектор признаков, состоящий из компонентов средней скорости переме-



Рис. 1. График изменения горизонтальной скорости пера при коэффициенте $max=0.5$



Рис. 2. График изменения горизонтальной скорости пера при коэффициенте $max=5$

щения пера между участками. А размерность вектора признаков можно регулировать путем изменения коэффициента *max*. Рассмотренный выше метод схож с алгоритмами детектирования экстремальных точек [7].

Исследование

Для оценки эффективности работы алгоритма и определения необходимого значения коэффициента *max* было проведено исследование на примере нескольких образцов, принадлежащих разным пользователям.

Значение коэффициента *max* изменялось от 0.5 до 5. Относительно показателей средней скорости на отрезках траектории по исходным и получаемым после обработки данным рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона и сумма разности квадратов между соответствующими значениями. Результаты для нескольких образцов представлены в таблицах 1, 2 и 3, соответственно.

На рис. 1 и 2 представлены графики горизонтальной скорости перемещения пера при исходных данных и при обработке алгоритмом с *max* = 0.5 и *max* = 5, соответственно, для первых 130 точек. При увеличении коэффициента *max* количество отбираемых точек сокращается, сумма квадратов разностей увеличивается, а коэффициент корреляции Пирсона уменьшается.

Из графиков (рис. 1, рис. 2) можно наблюдать, что увеличение значения *max* приводит к сглаживанию значений средней скорости на всем протяжении траектории. Для каждого образца, в зависимости от формы его траектории, при одном и том же значении *max*, коэффициент корреляции может сильно отличаться. Однако при малых его значениях коэффициент Пирсона достаточно высок.

Второй этап исследования состоит в проверке следующей методики. Первый образец обрабатывался алгоритмом со значением *max* близким к нулю и запоминалась размерность полученного вектора признаков.

Все последующие образцы обрабатывались алгоритмом до тех пор, пока размерность вектора не станет равна размерности вектора первого образца, за счет постепенного увеличения коэффициента *max*. Для проверки этой гипотезы были взяты 20 образцов от 40 пользователей (*user*), 20 образцов от 40 специализирующихся на подделке подписей злоумышленников (*user_1*), которые наблюдали за процессом написания, и набор из 1600 случайных подписей (*user_2*). Первая подпись каждого пользователя обрабатывалась алгоритмом с *max*=0.1. Результаты исследования представлены в таблице 4. Графа «Номер» соответствует номеру пользователя, чья первая подпись вступала эталоном.

Из таблицы 4 видно, что среднее значение коэффициента *max* для легального пользователя, как правило, ниже, чем у потенциальных злоумышленников. Этот факт позволяет использовать рассматриваемый алгоритм не только в целях приведения вектора признаков к единой длине, но и получения дополнительного параметра, характеризующего пользователя. Однако данный алгоритм будет выдавать значение *max*=0.0 для всех образцов, длина которых меньше длины обработанного первого образца. В этом случае разница в длине компенсируется нулевыми значениями, что скажется при дальнейшей цифровой обработке.

Рассмотренный алгоритм применим для решения задач приведения размерности векторов признаков нескольких образцов, изначально имеющих траекторию различной длины, к одному значению. Это актуально для дальнейшего использования при машинном обучении, где на вход, как правило, подаются данные определенной длины. Таким образом, размерность вектора признаков пользователя задается, как длина самого короткого образца или константой. А для всех последу-

Таблица 1

Сравнение двух рядов данных: до и после обработки алгоритмом

Образец	Значение коэффициента <i>max</i>	Количество отобранных точек, %	Компонент скорости	Коэффициент корреляции Пирсона	Сумма квадратов разностей
1	0.5	42	горизонтальный	0.77	15.3
			вертикальный	0.77	19.3
	0.75	32	горизонтальный	0.71	19.1
			вертикальный	0.72	23.6
	1	29	горизонтальный	0.62	22.3
			вертикальный	0.71	24.5
	1.5	25	горизонтальный	0.61	23
			вертикальный	0.70	25
	2	22	горизонтальный	0.60	23.3
			вертикальный	0.69	25.6
	5	15	горизонтальный	0.58	24.2
			вертикальный	0.68	26.9

Таблица 2

Сравнение двух рядов данных: до и после обработки алгоритмом

Образец	Значение коэффициента <i>max</i>	Количество отобранных точек, %	Компонент скорости	Коэффициент корреляции Пирсона	Сумма квадратов разностей
2	0.5	54	горизонтальный	0.93	13.6
			вертикальный	0.89	16.9
	0.75	47	горизонтальный	0.93	14.4
			вертикальный	0.88	18.2
	1	44	горизонтальный	0.88	24.7
			вертикальный	0.88	18.7
	1.5	41	горизонтальный	0.87	26.3
			вертикальный	0.87	19.3
	2	36	горизонтальный	0.87	26.4
			вертикальный	0.88	18.7
	5	24	горизонтальный	0.87	26.4
			вертикальный	0.86	20.9

Таблица 3

Сравнение двух рядов данных: до и после обработки алгоритмом

Образец	Значение коэффициента <i>max</i>	Количество отобранных точек, %	Компонент скорости	Коэффициент корреляции Пирсона	Сумма квадратов разностей
3	0.5	48	горизонтальный	0.75	348.2
			вертикальный	0.70	134.9
	0.75	38	горизонтальный	0.73	369.1
			вертикальный	0.68	142.7
	1	31	горизонтальный	0.73	378.4
			вертикальный	0.67	149.5
	1.5	26	горизонтальный	0.68	413.1
			вертикальный	0.67	150.6
	2	22	горизонтальный	0.67	151.4
			вертикальный	0.61	458.3
	5	14	горизонтальный	0.55	484.1
			вертикальный	0.63	160.6

ющих образцов можно постепенно увеличивать коэффициент *max* до тех пор, пока размерность вектора на выходе алгоритма не станет равна нужному значению. При этом коэффициент Пирсона образцов относительно исходных данных остается высоким.

Однако если какой-либо исходный образец пользователя состоит из значительно меньшего числа точек, чем остальные, то на выходе алгоритма размерность вектора признаков для образцов будет мала. Это приведет к потере ценной информации. Чтобы избежать подобной ситуации, необходимо делать предобработку входных данных, а именно заранее оценивать длину образцов и исключать подозрительные.

Выводы

Был разработан и реализован алгоритм, формирующий вектор признаков человека определенной размерности по динамике написания им некоего парольного слова или фразы. В качестве компонента вектора признаков использовались значения горизонтальной и вертикальной составляющих средней скорости движения пера между соседними точками траектории. Проведено исследование алгоритма на работоспособность и получены следующие результаты:

- коэффициент Пирсона для параметров скорости исходных данных и данных на выходе алгоритма с уста-

Результат работы алгоритма на выборке

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
user	7,05	0,63	1,63	1,78	0,13	0,28	2,18	1,15	0,10	1,00
user_1	11,78	6,08	2,33	1,73	1,30	0,50	2,03	2,48	1,43	4,30
user_2	37,57	13,38	16,50	7,48	3,95	3,74	3,36	5,90	0,49	9,39
Номер	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
user	0,10	0,30	0,38	0,58	0,23	0,10	1,75	0,40	0,48	0,28
user_1	1,18	2,30	0,38	0,50	1,90	0,48	1,88	1,58	3,95	3,73
user_2	11,62	4,91	1,83	3,24	1,14	2,50	0,15	1,56	7,76	17,98
Номер	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
user	0,58	0,10	0,10	0,10	1,73	0,13	0,93	0,45	0,10	0,25
user_1	2,65	2,73	2,08	2,20	3,38	3,20	2,58	4,68	1,03	2,55
user_2	6,23	3,67	0,24	3,88	19,65	3,02	6,01	11,62	6,01	12,84
Номер	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
user	0,10	0,10	1,25	1,75	0,18	1,65	0,30	1,95	1,73	0,53
user_1	0,83	0,10	4,43	5,28	1,20	3,35	6,50	5,63	3,93	1,73
user_2	5,28	3,95	12,58	11,18	2,15	32,17	22,46	25,83	5,19	1,89

новленным значением коэффициента *max* близким к нулю достаточно высок;

– увеличение коэффициента *max* приводит к уменьшению размерности вектора признаков на выходе алгоритма;

– образцы легального пользователя имеют, как правило, небольшие расхождения по длине траектории, что приводит к незначительному увеличению коэффициента *max*, по сравнению с образцами злоумышленников;

– значение коэффициента *max* можно использовать в качестве дополнительного параметра для решения задачи аутентификации пользователя.

Литература

1. Глобальное исследование утечек конфиденциальной информации в 2015 году [Электронный ресурс] / Аналитический центр компании InfoWatch. – Режим доступа: https://www.infowatch.ru/sites/default/files/report/analytics/russ/InfoWatch_Global_Report_2015.pdf?rel=1, свободный. – Загл. с экрана.

2. Thumwarin, P. FIR signature verification system characterizing dynamics of handwriting features [Электронный ресурс] / P. Thumwarin, J. Pernwong, T. Matsuura // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2013. – No. 183. – Режим доступа: <https://asp-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-6180-2013-183>, свободный. – Загл. с экрана.

3. Prathiba, M. K. Online handwritten signature verification system: A Review / M.K. Prathiba, L. Basavaraj // IJETTCS. – 2014. – No. 3. – P. 263–267.

4. Местецкий, Л. М. Математические методы распознавания образов / Л.М. Местецкий. – М.: МГУ, 2004. – 85 с.

5. Еременко, А. В. Повышение надежности идентификации пользователей компьютерных систем по динамике написания паролей : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.19 / А.В. Еременко. – Омск, 2011. – 20 с.

6. Li, X. Detection of Extreme Points of On-line Handwritten Scripts / X. Li, M. Parizeau, R. Plamondon // Progress in Handwriting Recognition, edited by A. C. Downton and S. Impedovo. – World Scientific, 1997. – P. 169–176.

7. Колядин, Д. В. Алгоритм выделения экстремальных точек применительно к задаче биометрической верификации рукописной подписи / Д.В. Колядин, И.Б. Петров // Исследовано в России. – 2005. – С. 532–540.

ГЕО

ГЕОИНФОРМАТИКА

(25.00.35*)

Информатика

- Теоретические и экспериментальные исследования в области развития научных и методических основ геоинформатики.
- Технические средства сбора, регистрации, хранения, передачи и обработки геоинформации с использованием вычислительной техники.
- ГИС разного назначения, типа, пространственного охвата и тематического содержания.
- Базы и банки цифровой информации и системы управления базами данных.
- Базы знаний по разным предметным областям.
- Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС.
- Геомоделирование, системный анализ многоуровневой и разнородной геоинформации.
- Компьютерные геоизображения новых видов и типов, анимационные, мультимедийные, виртуальные и другие электронные продукты.
- Геоинформационные инфраструктуры, методы и технологии хранения и использования геоинформации на основе распределенных баз данных и знаний.
- Телекоммуникационные системы сбора, анализа, обработки и распространения пространственно-временной геоинформации.
- Взаимодействие геоинформатики, картографии и аэрокосмического зондирования.

раздел

ГЕО

информатика

* В соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25.02.2009 № 59 (в ред. Приказов Минобрнауки РФ от 11.08.2009 N 294, от 10.01.2012 N 5)

Объектно-ориентированная геопространственная информация, достоинства и недостатки при ее создании и применении

Object-oriented geospatial information, advantages and disadvantages in its creation and application

Зализнюк / Zaliznyuk A.

Александр Николаевич
(compas66@mail.ru)
Заслуженный работник геодезии и картографии РФ.
Начальник Военно-топографического
управления ГШ ВС РФ,
начальник Топографической службы ВС РФ.
г. Москва

Александров / Alexandrov Y.

Юрий Сергеевич
(alr1949@yandex.ru)
27 ЦНИИ МО РФ,
научный сотрудник
г. Москва

Присяжнюк / Prisyazhnyuk S.

Сергей Прокофьевич
(office@itain.ru)
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
действительный член Академии инженерных наук
им. А. М. Прохорова.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики»
(Университет ИТМО),
заведующий кафедрой ГИС.
г. Санкт-Петербург

Карманов / Karmanov D.

Дмитрий Викторович
(kdemo@yandex.ru)
кандидат технических наук.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
заместитель генерального директора
по развитию ГИС.
г. Санкт-Петербург

Присяжнюк / Prisyazhnyuk A.

Андрей Сергеевич
(pas@itain.ru)
кандидат технических наук.
Университет ИТМО,
доцент кафедры ГИС.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: геоинформатика – geoinformatics; геопространственная информация – geospatial information; объектно-ориентированная модель – object-oriented model; база данных – database; эффективность – efficiency.

В статье рассматривается информационная модель объектно-ориентированной геопространственной информации, ее преимущества при использовании в современных автоматизированных системах управления и особенности при ее создании и применении в геоинформационных системах.

The article considers the information model of object-oriented geospatial information, its advantages when used in modern automated control systems and features when it is created and used in geoinformation systems.

В наступивший информационный век, характеризующийся интенсивным внедрением сложных информационных систем, решающих задачи управления на базе геопространственной информации (ГПИ), требуется пересмотр принципов и подходов создания и применения ГПИ. Комплексность, оперативность и точность решения совокупности разнородных задач в различных предметных областях затрудняет решение проблемы обеспечения и применения ГПИ старыми методами. В этой связи все более актуальным и приоритетным направлением становится оперативная всесторонняя интеграция разнородной и актуальной геопространственной информации за счет реализации сетеориентированного подхода и представления ГПИ в объектно-ориентированном виде. Так как системообразующим элементом сетеориентированного подхода обеспечения

ГПИ являются распределенные банки данных ГПИ, поддерживающие функционально информационные системы поддержки принятия решений в различных предметных областях за счет эффективного функционирования объектно-ориентированных баз данных геопространственной информации, то необходим прорыв и в этом направлении.

В настоящее время имеется ряд проблемных вопросов в направлении создания объектно-ориентированных баз данных ГПИ и на их основе интеллектуальных информационных систем, действующих на принципах сетцентрического управления и применения когнитивных геоинформационных систем (ГИС). Это прежде всего создание информационных моделей объектно-ориентированной ГПИ, таких как базовые пространственные объекты и тематически ориентированные объекты. Принципы создания данных моделей должны быть максимально ориентированы на применение их в автоматизированных системах управления. Основное назначение информационной модели заключается в том, чтобы установить взаимосвязь между предметной областью и прикладными задачами, которые должны решаться на основе этой информации, т.е. она обеспечивает наиболее удобный интерфейс между прикладными задачами и информацией, хранящейся в базе данных, а также позволяет повысить эффективность использования методов и средств ее обработки в различных комплексах средств автоматизации.

В традиционной картографической модели ГПИ ориентирована на визуальное восприятие картографического материала и не отражает внутреннего содержания объектов, что приводит к потере информации и делению объектов местности на самостоятельные части. Такой подход создает много трудностей в программной обработке ГПИ в прикладных задачах в автоматизированных и геоинформационных системах. Без предварительной подготовки пространственные данные (сшивки, исправление значений координатных и атрибутивных описаний, поиск недостающих частей объектов на картах других масштабов или производителей и т.д.) не могут быть использованы при решении задач поддержки принятия решений.

Существенные трудности возникают в «традиционной» модели при создании мультимасштабных карт, которые создаются путем наложения карт разных масштабов на одну и ту же территорию. При этом объекты реального мира состоят из совершенно различных несвязанных объектов карты. Это приводит к множеству ошибок, возрастанию сложности прикладного программного обеспечения и увеличению ресурсов информационных систем и в конечном итоге к снижению эффективности информационных систем.

Попытки уйти от представленных выше проблем: такие как сшивка листов в единые районы или атласы, попытки заполнения специальных атрибутов объектов ссылками на другие части объектов, не решают главной задачи – обеспечение АСУ качественным цифровым

картографическим материалом, предназначенным не только и не столько для восприятия карты человеческими органами чувств, но ориентированных на понимание системами машинного зрения и искусственного интеллекта, т.е. перейти к модели целостного представления объектов местности в виде, приближенном к естественным условиям существования. Такая модель геопространственных данных является не картографически-ориентированной, а объектно-ориентированной.

Объектно-ориентированная модель пространственных данных – это новый способ представления пространственных данных, направленный, в первую очередь, на информационное обеспечение прикладных задач и процессов моделирования в когнитивных ГИС за счет обеспечения максимального соответствия картографического объекта, как модели соответствующего ему объекта реального мира.

Преимущества объектно-ориентированной модели представления и хранения пространственных данных:

1) Принцип – хранение всех данных одного объекта реального мира обеспечивается одним единственным экземпляром базы данных.

2) Позволяет автоматически формировать карты заданных свойств (район, состав, масштаб, объектовый и атрибутивный состав).

3) Обеспечение однозначности, единства и целостности пространственных данных при использовании в расчетных задачах АСУ в сетевых интеллектуальных информационных системах поддержки принятия решений.

4) Обновление пространственных объектов не по номенклатурным листам, а "пообъектно" позволяет снизить себестоимость работ по обновлению ГПИ за счет использования данных профильных ведомств (кадастр, строительная топосъемка, проектная исполнительская документация и др.).

5) Поддержка на уровне модели топологических отношений между заданными классами пространственных объектов и снижение числа ошибок в картах за счет средств автоконтроля топологических отношений между объектами (остров-озеро и др.)

6) Поддержка пользовательских моделей пространственных данных и произвольных систем классификации, принятых в ГИС разного назначения.

7) На переходный период, вследствие отсутствия когнитивных ГИС, работающих напрямую с объектно-ориентированной моделью, объектно-ориентированная модель позволяет использовать картографическую модель и существующие картографические материалы для наполнения баз данных. Однако впоследствии с разработкой когнитивных объектно-ориентированных ГИС объектно-ориентированная модель должна полностью заменить "традиционный" подход к пространственным данным.

8) Обеспечивается главный переход к объектно-ориентированным базам знаний об объектах реального мира с высокоточной координатной привязкой.

Сущность предлагаемой новой модели пространственных данных для создания информационных систем обеспечения когнитивных геоинформационных систем заключается в следующем: выделение пространственного объекта в отдельный класс должно основываться только на его сущности, т. е. на том свойстве, которое отличает его от других объектов и не изменится на протяжении всего его жизненного цикла. Примерами таких сущностных пространственных объектов являются: автомобильная дорога, водоток, водоем, древесная растительность, болото, населенный пункт, капитальное строение. Такой сущностный пространственный объект должен обязательно обладать описанием своего местоположения в пространстве в виде координатного или адресного описания или и того, и другого одновременно. У объекта может быть несколько координатных описаний, отличающихся точностью, детализацией (генерализация), и все они имеют право на взаимосвязанное существование.

Пространственный объект может быть образован путем агрегирования других пространственных объектов, не имея своего адресного или координатного описания. К таковым, например, можно отнести понятие «Улица» в населенном пункте. Под улицей можно понимать совокупность строений и проезжих частей, объединенных единым свойством – собственным названием.

Сущностная классификация пространственных объектов и их уникальная идентификация приведет к устранению каких-либо противоречий между различными поставщиками данных и пользователями и даст возможность использовать общие каталоги объектов для привязки метаданных и обмена информацией в инфокоммуникационных сетях в защищенном режиме.

Пространственный объект в области своего распространения может обладать различными свойствами, не влияющими на его сущность. Свойства могут исчезать, появляться, перемещаться по объекту, но существуют они только вместе с объектом и всегда можно указать их местоположение на его координатном описании. Единственным свойством, описывающим объект целиком, может быть только собственное название.

Описание каждого свойства имеет свое местоположение или свою область распространения на объекте как линейном, так и площадном, т. е. свойства получают свое координатное описание на общем координатном описании объекта, не разрушая последнее. Координатное описание свойств, в свою очередь, может быть точечным, линейным или площадным.

Унификация такого описания свойств состоит в следующем:

- редактирование свойств не влияет на координатное описание объекта, как это имеет место в нынешней модели;
- каждое свойство приобретает характер локализации – точка, линия или область;
- описание каждого свойства независимо от описаний других свойств (допускается наложение и пересечение свойств).

Реализация иерархической связи позволит не дублировать значение свойства в подписи, а хранить только один раз, что автоматически исключит ошибки несоответствия значения атрибутов объектов и подписей. Одновременно можно хранить несколько подписей отображения значения одного свойства на картах разных масштабов и в разных условных знаках.

Наличие такой связи поможет в решении еще одной проблемы – открытых и закрытых карт. Сегодня в фондах хранятся оба вида карт, т. е. информация в значительном объеме дублируется. Кроме того, существующая технология создания открытых карт не позволяет создавать их полностью автоматически из-за отсутствия связи в значениях атрибутов и подписей, подлежащих удалению. Предложенная модель позволит полностью автоматизировать процесс и исключить дублированное хранение информации в закрытых и открытых картах.

Для ряда пространственных объектов, особенно линейно протяженных и больших площадных, встает вопрос о правилах их выделения в самостоятельные единицы. Основываясь на сущностной формулировке понятия пространственного объекта и принципе независимого описания свойств, можно предложить следующие правила разделения или выделения объекта в самостоятельную единицу:

- по его визуальным внешним признакам на местности;
- по собственному названию, которое, как правило, является основным свойством, определяющим выделение объекта.

Координатное описание выделенного объекта по возможности представляется непрерывным, например для водотоков (реки, ручьи, каналы), автомобильных и железных дорог, линий электропередач и трубопроводов. Автомобильные дороги «правильно» разделять населенными пунктами, в которых уличная сеть «размывает» проходящие через них магистральные дороги, и не разделять в населенных пунктах, через которые дорога проходит однозначно. Железные дороги, по аналогии, делятся железнодорожными узлами. Реку, имеющую собственное название, желательно иметь единым объектом с единственным значением названия. Большие площадные объекты грунтов и растительности целесообразно разделять естественными препятствиями – реками, дорогами и т. п. Других неестественных разделений объектов желательно избегать. Такое выделение объектов удобно с точки зрения их идентификации и инфраструктуры пространственных данных.

После реализации всех вышесказанных принципов совершенно очевидным становится то, что новая модель представления пространственных данных не содержит элементов оформления карт в условные знаки топографических карт, что являлось основным принципом классификации и выделения объектов цифровой карты. Это позволит из новой модели данных в любое время

получить готовый к изданию продукт, поскольку все оформление в условные знаки может быть выполнено автоматически.

Отдельное хранение правил и элементов оформления пространственных объектов в объекты картографических изображений с применением элементов автоматизированной генерализации позволит быстро получать различные производные картографические продукты.

Предложенная модель представления пространственных объектов отличается от существующей модели и от общепринятых моделей представления цифровых карт в различных ГИС-средах по таким существенным признакам, как множественность вариантов координатного описания объекта или полное его отсутствие и иерархическая связь объекта со свойствами и подписями. Реализация таких возможностей в используемых в настоящее время ГИС-средах затруднительна (практически невозможна). Добавив к этому необходимость ведения мониторинга и хранения метаданных на каждый атрибут объекта и его координатное описание, приходим к выводу, что единственной реально возможной «средой обитания» и мониторинга данных в такой модели является реляционная система управления базами данных (СУБД), в которой необходимо спроектировать хранилище пространственных объектов. Хранилище должно будет принимать данные из ГИС-среды, использоваться для выполнения операций мониторинга и формировать требуемые наборы цифровых картографических данных по запросам различных потребителей.

Реализация нового подхода требует разработки целого ряда новых моделей:

1) Создание нового каталога (классификатора) пространственных объектов и правил их выделения.

Данный каталог разрабатывается на основе существующего классификатора с учетом следующих требований:

- элементами каталога становятся только существенные объекты;
- на основании нынешних кодов объектов и их семантических характеристик составляется расширенный список свойств;
- объекты группируются со своими свойствами;
- удаляются все объекты и атрибуты графического оформления карт, которые могут быть автоматически получены по значению свойств объектов;
- добавляются специальные служебные атрибуты для описания метаданных и иерархических связей между объектами и свойствами.

2) Необходима модель преобразования существующих карт к новому каталогу объектов. Преобразование включает в себя следующие операции:

- выделение и перенос свойств объектов из кодов в атрибуты;
- перекодировка в существенные объекты;
- установление иерархических связей между объектами, свойствами и подписями;

- корректировка ошибок, выявленных в процессе установления иерархических связей;
- удаление дублированных значений атрибутов;
- удаление элементов графического оформления карты.

В результате в базе данных остаются только существенные объекты. Вся остальная информация иерархически связывается с ними в виде атрибутивных описаний.

3) Необходима модель сшивки объектов в единую карту на территориальную единицу. На данном этапе выполняется:

- преобразование координат пространственных объектов в геоцентрическую систему координат;
- сшивка пространственных объектов всех смежных листов на выбранный участок территории с учетом сформулированных правил выделения объектов.

В качестве участка территории, на который выполняется формирование единой карты, может быть выбран субъект Российской Федерации или ряд смежных субъектов.

4) Необходимы модели идентификации пространственных объектов и запись метаданных.

Выделенным и сшитым объектам присваиваются уникальные идентификаторы для обеспечения их последующей интероперабельности с другими информационными системами. Присвоение начальных метаданных атрибутам и координатным описаниям пространственных объектов выполняется на основании имеющихся метаданных. Подготовленная таким образом цифровая карта с пространственными идентифицированными объектами и начальными метаданными хранится в хранилищах.

5) Необходимы модели обмена данными в инфокоммуникационных сетях, для чего нужна модель обменного формата.

6) Нужна модель интеллектуальной (когнитивной) объектно-ориентированной ГИС для формирования сервисных услуг в сетевом режиме.

7) Нужны модели интеграции пространственных объектов в защищенное единое геоинформационное пространство с топологическим контролем между существующими и добавляемыми объектами.

Реализация предложенного объектно-ориентированного представления геопространственной информации в новой технологии формирования единого геоинформационного пространства дает новые конкретные преимущества.

1. Высокое качество описания свойств объектов местности.
2. Высокая оперативность обновления пространственных данных.
3. Сокращение размеров хранилищ пространственных данных.
4. Высокая оперативность предоставления пользователям обновленной геопространственной информации с требуемым уровнем детализации.

5. Более эффективный учет и экономическая политика.
6. Более эффективная система обеспечения безопасности данных.
7. Простота и удобство эксплуатации ГИС.
8. Расширенные возможности обеспечения доступа к данным.
9. Высокий уровень унификации при интеграции с другими ГИС государственного уровня.
10. Создание эффективных распределенных баз знаний об объективной реальности в физическом мире.

Литература

1. Присяжнюк, С. П. Концептуальная модель создания объектно-ориентированной базы данных об объектах местности с целью поддержания в актуальном состоянии навигационных карт и планов / С.П. Присяжнюк, Д.В. Карманов // *Информация и Космос*. – 2012. – № 3–4. – С. 36–40.
2. Осипов, Г. К. Теоретические и методические основы формирования объектно-ориентированной информационной модели навигационной базы данных / Г.К. Осипов, А.С. Присяжнюк, А.Н. Ефимов // *Информация и Космос*. – 2013. – № 1. – С. 35–40.
3. Карманов, Д. В. Концепция развития объектно-ориентированного информационного обеспечения геоинформационных систем / Д.В. Карманов, Ю.А. Комосов, Т.Н. Аксенова // *Информация и Космос*. – 2015. – № 3. – С. 143–148.
4. Зализнюк, А. Н. Обзор и анализ используемых и перспективных форматов геопространственных данных / А.Н. Зализнюк, Ю.С. Александров // *Информация и Космос*. – 2015. – № 3. – С. 102–108.
5. Зализнюк, А. Н. Стратегическое планирование геоинформационного обеспечения систем управления / А.Н. Зализнюк, С.П. Присяжнюк // *Информация и Космос*. – 2016. – № 4. – С. 130–132.
6. Важенин, И. А. Технология хранения мультимасштабных пространственных данных в объектно-ориентированной базе геоданных ArcGIS / И.А. Важенин, М.С. Гусачев, Д.В. Карманов // *Информация и Космос*. – 2013. – № 1. – С. 26–29.
7. Харрингтон Д. Проектирование объектно-ориентированных баз данных. – М.: ДМК Пресс, 2001 – 272 с.

Построение 3D-моделей объектов захоронения отходов и оценка их объемных характеристик

Construction of 3D models of waste disposal facilities and assessment of their volumetric characteristics

Шахраманьян / Schachramanian M.

Михаил Андраникович

(7283763@mail.ru)

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
почетный строитель РФ, изобретатель СССР,
дважды лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники,
академик Российской академии естественных наук,
Международной академии информатизации,
Международной академии наук Евразии,
Всемирной академии комплексной безопасности.
Владикавказский филиал ФГБОУ ВО «Финансовый
университет при Правительстве Российской
Федерации» (Финансовый университет),
профессор кафедры математики и информатики.
г. Владикавказ

Казарян / Kazaryan M.

Маретта Леоновна

(marettak@bk.ru)

кандидат физико-математических наук, доцент,
профессор Российской академии естествознания.
Владикавказский филиал Финансового университета,
заведующая кафедрой математики и информатики.
г. Владикавказ

Рихтер / Richter A.

Андрей Алексеевич

(7283763@mail.ru)

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт
аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,
программист.
г. Москва

Ключевые слова: космическое изображение – space image; объект захоронения отходов – waste disposal facility; полигон ТБО – solid waste landfill; свалка – dump; 3D-модель – 3D-model; 3D-моделирование – 3D-modeling; геометрические параметры – geometric parameters; объем – volume; площадь поверхности – surface area; высота – height; 3D-образ – 3D-image; регрессия – regression; поверхность регрессии – regression surface.

В работе предлагается методика построения 3D-моделей объектов захоронения отходов (свалок, полигонов твердых бытовых отходов, терриконов и т.д.) по данным высотных изображений. Представлена блок-схема методики и описаны основные этапы обработки. Приведена общая классификация пространственных геометрических параметров объектов захоронения отходов, к которым относятся объем, площадь поверхности, высота, угол откоса, шероховатость, параметры эквивалентного эллипсоида, радиальные и радиально-временные изменения концентрации замусоривания и т.д. Описаны формулы расчета некоторых наиболее важных из них. Обозначены основные виды трехмерных образов объектов захоронения отходов (уровни высот, контур поверхности, изображение поверхности).

The article proposes a method of construction of 3D-models of objects landfills (dumps, landfills, municipal solid waste, waste heaps, etc.) according to the high-altitude images. A block diagram of the technique has been presented and the main processing steps are described. The general classification of spatial geometrical parameters of waste disposal facilities has been given, including volume, surface area, elevations, angle of slopes, roughness, parameters of an equivalent ellipsoid, radial and radiolo- temporal changes in the concentration of litter, etc. The formulas for calculating some of the most important of them have been described. The main types of three-dimensional images of waste disposal sites (elevation levels, surface contour, surface image) have been indicated.

Введение

Одним из направлений космического мониторинга объектов захоронения отходов (ОЗО) [1–4] является построение трехмерных моделей ОЗО и вычисление по 3D-моделям объемных геометрических параметров и характеристик по данным изображений уровней высот поверхности земли (радарная съемка). В работе [1] были описаны плоскостные геометрические параметры ОЗО и их оценка по изображениям детектирования областей замусоривания, полученным по разработанной методике детектирования ОЗО, в частности [2–3]. Однако ОЗО, особенно крупный, является прежде всего объемным объектом, и по данным 3D-моделей ОЗО можно рассчитать как плоскостные, так и пространственные параметры, т.е. получить более полную информацию о геометрии свалки.

Постановка задачи

ОЗО имеют различную высоту и площадь. С точки зрения площади их можно разбить на мелкие, средние и крупные, а с точки зрения высоты – на глубинные (верхняя отметка высоты ниже среднего уровня поверхности земли), плоские (верхняя отметка высоты сравнима с уровнем поверхности) и высотные (верхняя отметка высоты значительно выше уровня поверхности).

Захламления отходов (небольшие свалки) более вероятно имеют горизонтальное ориентирование. Однако чем больше свалка по площади (терриконы, крупные муниципальные и городские свалки, золоотвалы и др.), тем больше она «вмещает» в себя мусора по высоте и тем более вероятно, что она причисляется к высотным ОЗО, т.е. имеет вертикальное ориентирование и тем проще ее обнаружить как по мультиспектральным, так и по высотным изображениям.

Предлагается методика построения 3D-моделей [5–9] свалки и оценки ее пространственных геометрических параметров по ее высотному изображению, к которым относятся: объем, высота, угол откоса, площадь поверхности и т.д. Чем выше пространственное и высотное разрешение изображения высоты, тем точнее строится 3D-модель свалки и оцениваются геометрические параметры. При этом плоскостным геометрическим параметрам ставится в соответствие пространственные, которые являются более точными, за счет предоставления пространственной «невязки». Так, площадь основания и периметр, рассчитанные в плоскости, отличаются от площади основания и периметра, рассчитанные в пространстве.

Описание методики

Блок-схема 3D-моделирования ОЗО отражена на рис. 1. В качестве исходных данных могут выступать космические изображения серий SIR-C и X-SAR (высотные снимки) (данные сайтов: <http://gis-lab.info/qa/srtm.html>, <https://earthexplorer.usgs.gov>). Исходные снимки SIR-C нуждаются в дополнительной обработке, чтобы привести их в специальной программе (в частности, в ENVI) к удобному формату (.tif, .jpg и др.), в котором каждый пиксель – высота точки на поверхности земли с соответствующими географическими координатами.

При известных географических координатах ОЗО, местоположение которых проведено методиками детектирования ОЗО по космическим изображениям [2–3], выделяется участок J высотного снимка [10–13] I по прямоугольной области U , описывающей ОЗО, или по области u покрытия ОЗО.

По данным изображения J выводится 3D-образ ОЗО. К формам представления трехмерных образов ОЗО относятся, в частности:



Рис. 1. Общая блок-схема 3D-моделирования ОЗО

1. Уровни высот: $H(x, y) = h(x, y) - h_{\min}$, $x = b_1 \cdot i$, $y = b_2 \cdot j$, $h(x, y) = b_3 \cdot I(x, y)$;

2. Контур поверхности: $z(x, y) : R[H(x, y)]$;

3. Изображение поверхности: $z(x, y), C(x, y)$.

b_1, b_2 – пространственное разрешение по оси абсцисс и ординат высотного изображения I , b_3 – высотное разрешение. (i, j) – координаты пикселя, (x, y, z) – соответствующие линейные координаты. H – модельная высота ОЗО в точке (x, y) , h_{\min} – минимальное значение яркости изображения I по области U . $R[9]$ – преобразование отчетов $H(x, y)$ в оптимизированную поверхность регрессии $z(x, y)$, полученную на множестве алгебраических функций вида $\sum_{i=0}^{\infty} p_i \cdot x^i \cdot y^k$ ($\{p_i\}$ – коэффициенты полиномов). $C(x, y)$ – цвет (полихром или мультихром) пространственной точки (x, y, z) , полученный по изображению K , геопривязанному к I . В качестве K (внешние данные) может быть изображение коэффициентов спектральной яркости или индексов подстилающей поверхности (ИПП) территории, например видимое изображение или изображение NDVI [14–16]. Тогда в форме (3) отображается текстура изображения K , покрывающая поверхность $z(x, y)$ ОЗО в пространстве.

По данным рассчитываются пространственные геометрические параметры ОЗО, которые в общем классифицируются на: 1) общие (объем, площадь покрытия, площадь поверхности, периметр, высота, угол откоса, вместимость, шероховатость поверхности и др.); 2) параметры статистического распределения или эквивалентного эллипсоида [9] (объемный центр масс, осевые и центральные моменты инерции, ориентация и др.); 3) параметры по пространственным направлениям (концентрация, вытянутость, объем, площадь и др.); 4) динамические параметры в пространстве (перемещение, скорость перемещения, фазовая траектория и др.).

Также выделим такие пространственные геометрические характеристики, как: 3D-контур, прогноз роста свалки в пространственных направлениях (в том числе в высоту), сечения профиля высоты, гистограммы распределения высот, тип, уравнение и график фигуры регрессии R , радиальные изменения в пространстве, перемещение границ ОЗО в пространстве, изображение высоты и др.

Рассмотрим оценку некоторых пространственных геометрических параметров ОЗО.

Максимальная высота ОЗО в момент времени t : $H_{\max} = \max_i (h_{\max i} - h_{\min})$, где $h_{\max i}$ – уровень высоты i -го локального пика в области u на высотном изображении I , снятом в наиболее близкий к t момент времени t' .

Шероховатость (неровность) поверхности свалки рассчитывается по формулам:

$$r_0 = E[r(x, y)], \quad r_{\min} = \min r(x, y), \\ r_{\max} = \max r(x, y); \quad r(x, y) = |h(x, y) - R_h(x, y)|,$$

где E – математическое ожидание, $h(x, y)$ – уравнение поверхности свалки, $R_h(x, y)$ – гладкая поверхность

регрессии реальной поверхности $h(x, y)$, $r(x, y)$ – отклонение реальной поверхности от ее регрессии (среднего значения в точке), r_{\min}, r_{\max}, r_0 – минимальное, максимальное и среднее значение шероховатости. Очевидно, функцию шероховатости $r(x, y)$ можно представить спектральным разложением в ряд Фурье для отделения более общих превышений высоты от более детальных.

Средняя высота свалки: $H_0 = h_0 - h_c$, $h_0 = E[h(x, y)]$, $h_c = E[c(x, y)]$, где $h(x, y)$ – область U объекта, $c(x, y)$ – контур области.

Уравнение выделения поверхности ОЗО по области u :

$$f(x, y) = K(x, y) \cdot h(x, y) \cdot \Pi(x, y), \quad \Pi(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in u \\ 0, & (x, y) \notin u \end{cases}$$

где $\Pi(x, y)$ – прямоугольная функция по области u , $K(x, y)$ – яркость пикселя изображения K в момент времени съемки t (в более общем виде: $K(x, y, t)$ для временной серии изображений J и K заданной территории).

По аналогии с характеристиками распределения замусоривания на плоскости, задаются характеристики распределения замусоривания в пространстве. В частности, радиальные и радиально-временные распределения в пространстве:

$$r(\alpha, \beta, t) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x - x_0}{z - z_0}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{y - y_0}{z - z_0}, \quad z = h(x, y, t).$$

(α, β, r) – координаты поверхности точек свалки в сферической системе координат; (X_0, Y_0, Z_0) – центр координат, в качестве которого можно принять центр масс ОЗО или место его зарождения, t – момент времени съемки. При построении пространственной радиальной сетки с заданными угловыми шагами h_α и h_β по α и β находится динамика изменений концентрации замусоривания в пространственных направлениях. В частности, при $h_\alpha = h_\beta = \pi/2$ находится динамика замусоривания (перемещение, скорость перемещения и др.) в основных геодезических направлениях (на север, запад, юг, восток, верх и низ). Заметим, что для построения изменения геометрии замусоривания в пространстве требуется серия геопривязанных радарных изображений. При наличии серий соответствующих изображений ИПП оцениваются значения ИПП [17–18] и их изменения в пространстве в тех или иных направлениях. Периметр в пространстве: $p = \sum_{i=1}^n A_i A_{i+1}$, где $A_1 A_2 \dots A_n A_1$ – последовательные точки линии $l(x, y, z)$ контура $c(x, y, z)$ основания ОЗО в пространстве, полученные обходом контура в пространстве аналогом метода правообходного (левообходного) жука на плоскости [9].

Площадь s поверхности ОЗО оценивается как сумма площадей элементарных четырехугольников q (пикселей изображения I) по области u – рис. 2:

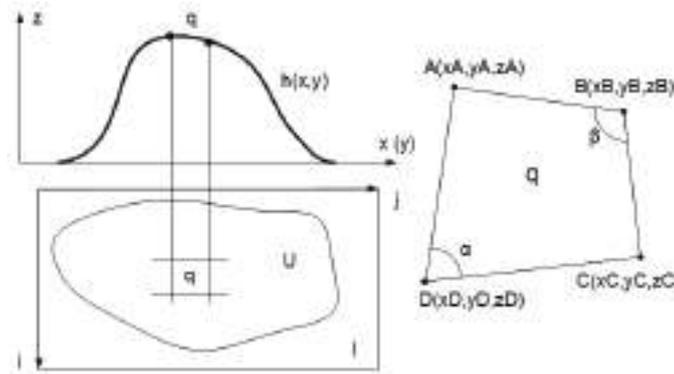


Рис. 2. Геометрические построения для оценки площади поверхности объекта по высотному изображению

$$s = \sum_{q \in U} s(q), \quad q = ABCD,$$

$$s(q) = \sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)(p-d) - abcd \cdot \cos^2 \theta}.$$

$$p = \frac{a+b+c+d}{2},$$

$$a = AB, b = BC, c = CD, d = DA, \quad \theta = \frac{\alpha + \beta}{2}.$$

Линейные координаты вершин четырехугольника q в пространстве:

$$x_A = b_1 \cdot i, y_A = b_2 \cdot j, z_A = b_3 \cdot I(i, j);$$

$$x_B = b_1 \cdot (i+1), y_B = y_A, z_B = b_3 \cdot I(i+1, j);$$

$$x_C = x_B, y_C = b_2 \cdot (j+1), z_C = b_3 \cdot I(i+1, j+1);$$

$$x_D = x_A, y_D = b_2 \cdot (j+1), z_D = b_3 \cdot I(i, j+1).$$

Из основ аналитической геометрии, по известным координатам (x, y, z) точек A, B, C, D в пространстве находятся длины отрезков и углы. Проекция элементов q на поверхность земли – пиксели изображения по области u . (x, y) – линейные координаты вершин этих пикселей с учетом пространственного разрешения.

Вместимость v свалки, т.е. максимальный объем, который она может принять, в зависимости от площади основания S из условия подобия геометрических фигур:

$$v = \frac{1}{3} [h \cdot S - h' \cdot S'], \quad h = h' + H,$$

$$h' = r \cdot \operatorname{tg} \alpha - H, \quad S' = \pi r'^2, \quad r' = r \cdot \frac{h'}{H + h'}.$$

H – задаваемая максимальная высота ОЗО, r и r' – радиусы эквивалентных окружностей нижнего S и верхнего S' оснований усеченного конуса, α – максимальный

угол откоса, при котором отходы свалки не рассыпаются по склону. Оценка текущего объема свалки по радарному изображению I : $V = b_1 b_2 b_3 \sum_{(x,y) \in U} I(x,y)$. Средний

угол откоса тела свалки оценивается по формуле: $f = E \left[\operatorname{arctg} \frac{dI}{k} \right]$, где dI – разность яркостей (высот) пикселей в области контура ОЗО и соседних с ними пикселей по области u по осям x или y .

Результаты работы алгоритма

Покажем результаты построения 3D-моделей высотных ОЗО и оценки некоторых пространственных геометрических параметров на примере трех, одних из наиболее крупных свалок Московского региона – рис. 3. Высотные изображения с пространственным разрешением ~60 м, высотным – ~1 м (февраль, 2000 г.) взяты с виртуального хранилища снимков [9] (проект SRTM [9]) и подвергнуты масштабированию, видимые изображения – в Google Earth.

По высотным изображениям I получены трехмерные образы данных ОЗО. На рисунке 4 показаны уровни высот в окрестности свалок (темные области на (а)) и поверхности регрессии для уровней высот по областям u покрытия ОЗО (светлые области на (б)).

По данным исторических расчетов (таблица 1) в течение 16 лет с 2000 по 2016 гг. произошло изменение высотности свалок, которое можно обнаружить методом визуального детектирования в программе Google Earth. На данный момент максимальная высота полигона Саларьево и террикона Белая Гора составляет ~80 м, т.е. средняя скорость роста в высоту составила ~2.3 м/год. Старый террикон Шиферная законсервирован и своз отходов на данный ОЗО не производится более 20 лет, в связи с чем его высотность не изменяется (см. исторические изображения террикона в программе Google Earth).

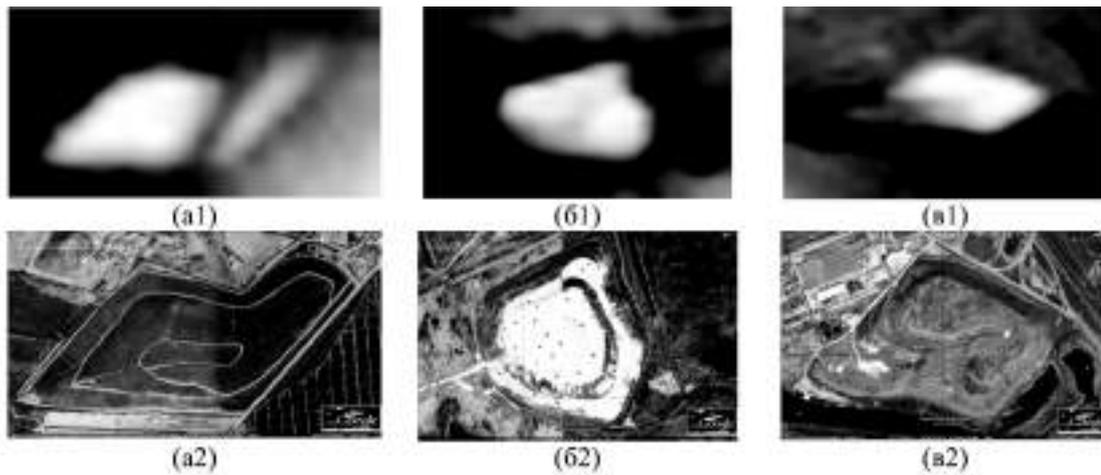


Рис. 3. Высота ОЗО: полигон ТБО и ПО Саларьево (а), действующий террикон отвалов фосфогипса Белая Гора (б), закрытый террикон между ст. Воскресенск и Шиферная вдоль казанской железной дороги (в); 1) высотные, 2) видимые изображения

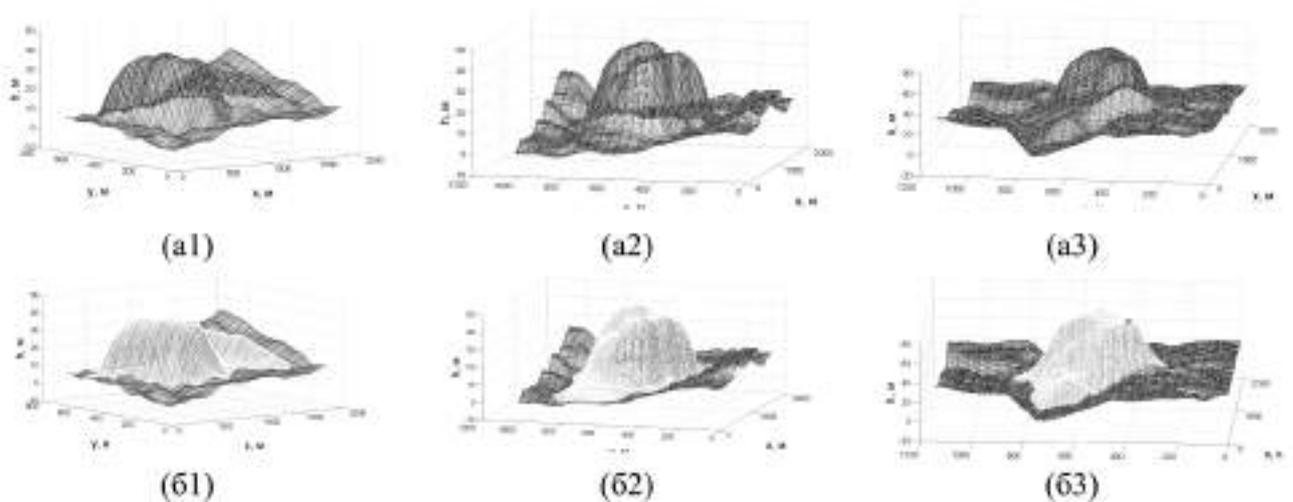


Рис. 4. Трехмерные образы ОЗО: а) по области U (серая область), б) по области U (темно-серая область); ОЗО 1) Саларьево, 2) Белая Гора, 3) Шиферная

Таблица 1

Некоторые пространственные параметры детектированных ОЗО, 2000 г.

Параметр	Саларьево	Белая Гора	Шиферная
Площадь покрытия, га	62	64	61
Максимальная высота, м	42	43	45
Средняя высота, м	30	35	31
Объем, $10^7 \cdot \text{м}^3$	1.12	1.4	1.67



Рис. 5. Профиль полигона ТБО Саларьево в одном из сечений: а) выделение сечения, б) линия высоты в сечении и характерные точки профиля А–Е

В частности, как видно из линии профиля в одном из высотных сечений (рис. 5), полигон Саларьево имеет 2 пика (в 2000 г.) с максимальными превышениями $h_{\max 1} = 221$ м и $h_{\max 2} = 212$ м (см. левый и правый кластер участка складирования – рис. 3 (a1)) при минимальном превышении $h_{\min} = 179$ м, а превышению у основания $h_c = 183$ м. Максимальная высота полигона: $H_{\max} = H_{\max 1} = h_{\max 1} - h_{\min} = 42$ м.

Выводы

Предлагаемая методика расчета пространственных геометрических параметров и характеристик по космическим изображениям, в частности объема и площади поверхности свалок, позволяет не только строить ее трехмерные образы, но и вообще проводить более полную оценку структуры, состава ОЗО и других классов параметров, таких как тепловые, компонентные влияния на окружающую среду, проводя построение соответствующих моделей в пространстве.

Литература

1. Оценка геометрических параметров областей замусоривания по мультиспектральным космическим изображениям / А.А. Рихтер [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2. – С. 2866–2870.
2. Рихтер, А. А. Метод визуального детектирования в задаче космического мониторинга объектов захоронения отходов / А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 61–67.
3. Шахраманьян, М. А. Выявление очагов замусоривания по данным космических изображений низкого пространственного разрешения Landsat / М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян, А.А. Рихтер // *Информация и Космос*. – 2016. – № 3. – С. 91–96.
4. Казарян, М. Л. Метод автоматизации оценки индексов подстилающей поверхности и их изменения во времени по космическим изображениям и его применение при оценке состояния окружающей среды в окрестности полигонов твердых бытовых отходов / М.Л. Казарян, А.А. Рихтер,

М.А. Шахраманьян // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327, № 8. – С. 52–58.

5. Силаев, Ю. В. Обзор основных направлений исследований по построению 3D-модели объекта по 2D изображениям / Ю.В. Силаев // *Российский технологический журнал*. – 2015. – Т. 2, № 4 (9). – С. 201–213.

6. Лежнина, Ю. А. Проблема получения 3D-модели по цифровым изображениям / Ю.А. Лежнина, К.А. Шумак, Н.Ю. Хроменко. // В сб.: *Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования* Материалы V Международного научного форума молодых ученых, студентов и школьников / Под общей редакцией Д.П. Ануфриева. – 2016. – С. 144–145.

7. Хроменко, Н. Ю. Методика получения 3D-модели по имеющимся плоским изображениям / Н.Ю. Хроменко // *Перспективы развития строительного комплекса*. 2016. – № 1. – С. 360–363.

8. Богданов, Д. О. Проектирование фотореалистичного 2D-изображения на основе 3D-модели / Д.О. Богданов, В.И. Луцейкович // В сб.: *Материалы докладов 49-й Международной конференции преподавателей и студентов*. – 2016. – С. 291–293.

9. Robust 3D face modeling and reconstruction from frontal and side images / Hai Jin [et al.] // *Original Research Article/ Computer Aided Geometric Design*. – January 2017. – Vol. 50. – P. 1–13.

10. Рыжаков, А. Н. Сравнительный анализ цифровых моделей рельефа, созданных на основе данных радарной и геодезической съемок / А.Н. Рыжаков // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. – 2016. – № 3 (63). – С. 18–23.

11. Matrix completion-based MIMO radar imaging with sparse planar array / Xiaowei Hu [et al.] // *Signal Processing*. – February 2017. – Vol. 131. – P. 49–57.

12. Synthetic bandwidth azimuth modulation imaging radar for airborne single-channel forward-looking imaging / Hongmeng Chen [et al.] // *Signal Processing*. – January 2017. – Vol. 130. – P. 86–92.

13. Virtual multi-offset reflection profiling with interferometric imaging for borehole radar / Lanbo Liu // *Signal Processing*. – March 2017. – Vol. 132. – P. 319–326.

14. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China / Yurui Li [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 20 January 2017. – Vol. 142, Part 2. – P. 697–715.

15. Land surface phenology derived from normalized difference vegetation index (NDVI) at global FLUXNET sites / Chaoyang Wu [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 15 February 2017. – Vol. 233. – P. 171–182.

16. Global evaluation of gap-filling approaches for seasonal NDVI with considering vegetation growth trajectory, protection of key point, noise resistance and curve stability / Ronggao Liu [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – February 2017 – Vol. 189. – P. 164–179.

17. The role of permafrost and soil water in distribution of alpine grassland and its NDVI dynamics on the Qinghai-Tibetan Plateau / Xiaoyun Wang [et al.] // *Global and Planetary Change*. – December 2016. – Vol. 147. – P. 40–53.

18. Multiparametric Magnetic Resonance Imaging (MRI) and MRI-Transrectal Ultrasound Fusion Biopsy for Index Tumor Detection: Correlation with Radical Prostatectomy Specimen / Jan P. Radtke [et al.] // *European Urology*. – November 2016. – Volume 70, Issue 5. – P. 846–853.

Оценка возможностей спутниковой градиентометрии по картографированию детального гравитационного поля Земли

Assessment of the possibilities of satellite gradient measurements for mapping the detailed gravitational field of the Earth

Алексеев / Alekseev V.

Виктор Федорович

(vfalex_vti@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского,

старший научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: аномальное гравитационное поле Земли – anomalous gravitational field of the Earth; спутниковая градиентометрия – satellite gradient measurements; вторые производные геопотенциала – second derivatives of the geopotential; спектральный метод – spectral method; спектральная плотность – spectral density; методы регуляризации – regularization methods; средняя квадратичная ошибка – mean square error.

В статье предлагаются уравнения для оценки средних квадратических ошибок определения аномалий силы тяжести на поверхности Земли по результатам обработки вторых производных геопотенциала, измеренных на спутниковых высотах. Показано, что для решения некорректной задачи пересчета результатов измерений со спутниковых высот на поверхность Земли могут применяться методы регуляризации. На основе выполненных исследований сделан вывод о возможности применения спутниковой градиентометрии для точного картографирования детальной структуры гравитационного поля Земли.

The article proposes equation for evaluating the mean square error determining anomalies of gravity on the Earth's surface based on the results of processing of the second derivatives geopotential altitudes measured at the satellite. It has been shown that regularization methods can be used to solve an incorrect problem of recalculating measurement results from satellite altitudes to the Earth's surface. On the basis of the studies carried out, it has been concluded that it is possible to use satellite gradient measurements for the accurate mapping the detailed gravitational field of the Earth.

Одним из наиболее перспективных новых методов оперативного получения информации о гравитационном поле Земли является спутниковая градиентометрия, которая обеспечивает покрытие измерениями всей поверхности Земли, как суши, так и моря. В данном методе на высотах порядка 250 км выполняются изме-

рения составляющих тензора вторых производных геопотенциала. Следовательно, для получения необходимых параметров аномального гравитационного поля (высот геоида, аномалий силы тяжести, составляющих уклонения отвесной линии) на земной поверхности придется решать задачу пересчета результатов измерений со спутниковых высот на поверхность Земли. Такая задача относится к классу некорректно поставленных и ее решение требует применения специальных математических методов, к которым относятся методы регуляризации.

В настоящей статье предлагается один из подходов к априорной оценке точности восстановления параметров аномального гравитационного поля на поверхности Земли по результатам обработки спутниковой градиентометрической информации.

Продолжение исходной информации со спутниковых высот на поверхность Земли и восстановление необходимых характеристик аномального гравитационного поля удобно выполнять с помощью спектрального метода. Тогда при отсутствии ошибок исходных данных, спектр точного решения задачи находится по формуле

$$S_D(\omega_x, \omega_y) = \frac{S_T(\omega_x, \omega_y)}{\Phi(\omega_x, \omega_y, H)}, \quad (1)$$

где $S_T(\omega_x, \omega_y)$ – спектр вторых производных возмущающего геопотенциала, определенных на спутниковых высотах H ;

$\Phi(\omega_x, \omega_y, H)$ – частотная характеристика выполняемого преобразования.

Для поиска регуляризованного решения будем использовать методы, предложенные А. Н. Тихоновым [4, 5] и М. М. Лаврентьевым [1, 2]. При использовании первого из рассматриваемых подходов спектр регуляризованного решения будет определяться из уравнения

$$S_{D_\alpha}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\Phi^*(\omega_x, \omega_y, H) \cdot S_T(\omega_x, \omega_y)}{|\Phi(\omega_x, \omega_y, H)|^2 + \alpha}, \quad (2)$$

где

* – символ комплексного сопряжения;
 α – параметр регуляризации.

Если для поиска устойчивого решения применяется метод М. М. Лаврентьева, то спектр регуляризованного решения будет определяться по формуле

$$S_{D_\alpha}(\omega_x, \omega_y) = \frac{S_T(\omega_x, \omega_y)}{\alpha + \Phi(\omega_x, \omega_y, H)}. \quad (3)$$

В качестве исходных данных будем использовать аномальную часть вертикального градиента силы тяжести, т.е. $T_{ZZ} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$. На земной поверхности будем восстанавливать функцию аномалий силы тяжести Δg . Тогда необходимая для решения задачи частотная характеристика будет иметь вид

$$\Phi(\omega_x, \omega_y, H) = \frac{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\exp(\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \cdot H)}. \quad (4)$$

Среднюю квадратическую погрешность аномалий силы тяжести $m_{\Delta g_\alpha}$, восстановленных на поверхности Земли по материалам обработки спутниковых градиентометрических данных T_{ZZ} , будем искать из уравнения

$$m_{\Delta g_\alpha} = (m_1^2 + m_2^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где m_1 – средняя квадратическая ошибка результата, вызванная применением метода регуляризации;

m_2 – средняя квадратическая ошибка результата, характеризующая влияние погрешностей исходных данных на регуляризованное решение.

Найдем выражение для оценки m_1 . Если применяется метод регуляризации, то будет определена функция $\Delta g_\alpha(x, y)$, отличающаяся от истинного решения $\Delta g(x, y)$ на $\delta g_\alpha(x, y)$, т.е.

$$\Delta g_\alpha(x, y) = \Delta g(x, y) + \delta g_\alpha(x, y) \quad (6)$$

или, переходя в частотную область,

$$S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y) = S_{\Delta g_\alpha}(\omega_x, \omega_y) - S_{\delta g_\alpha}(\omega_x, \omega_y). \quad (7)$$

Подставив (7) в (1) и учитывая (2), для метода А. Н. Тихонова определяется спектр ошибок за счет применения регуляризации

$$S_{\delta g_\alpha}(\omega_x, \omega_y) = -\frac{\alpha \cdot S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)}{\alpha + |\Phi(\omega_x, \omega_y, H)|^2}. \quad (8)$$

Допустим, что исходная функция аномальной части вертикального градиента силы тяжести T_{ZZ} и восстанавливаемая на земной поверхности функция аномалий силы тяжести Δg имеют спектры, ограниченные круговыми частотами $\omega_{xГР}$ и $\omega_{yГР}$. Тогда, используя зависимость между дисперсией и функцией спектральной плотности [3], можно найти искомую оценку m_1

$$m_1^2 = \int_{-\omega_{xГР}}^{\omega_{xГР}} \int_{-\omega_{yГР}}^{\omega_{yГР}} |S_{\delta g_\alpha}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y. \quad (9)$$

или, принимая во внимание четность подинтегральной функции

$$m_1^2 = 4 \int_0^{\omega_{xГР}} \int_0^{\omega_{yГР}} \frac{\alpha^2}{[\alpha + |\Phi(\omega_x, \omega_y, H)|^2]^2} \cdot |S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y. \quad (10)$$

Аналогичные рассуждения позволяют получить уравнение для оценки ошибки за счет регуляризации в методе М. М. Лаврентьева

$$m_1^2 = 4 \int_0^{\omega_{xГР}} \int_0^{\omega_{yГР}} \frac{\alpha^2}{[\alpha + \Phi(\omega_x, \omega_y, H)]^2} \cdot |S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y. \quad (11)$$

Функция спектральной плотности восстанавливаемых на поверхности Земли аномалий силы тяжести $|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2$, необходимая для решения задачи, может быть задана с помощью какой-либо модели, например, модели марковского типа III порядка (модели Джордана). Тогда [3]

$$|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 = \frac{15 \cdot m_{\Delta g}^2 (\omega_x^2 + \omega_y^2)}{4\pi \mu^3 [\mu^{-2} + (\omega_x^2 + \omega_y^2)]^{\frac{7}{2}}}, \quad (12)$$

где $\mu = \frac{R_{\Delta g}}{1.361}$; $m_{\Delta g}^2, R_{\Delta g}$ – дисперсия и радиус корреляции поля аномалий силы тяжести в исследуемом районе.

Для получения оценки m_2 допустим, что на исходный сигнал аддитивно наложен независимый «белый» шум, спектральная плотность которого равна

$$|S_{\delta T}(\omega_x, \omega_y)|^2 = \begin{cases} L, & \text{если } 0 \leq \omega_x \leq \omega_{xГР}, 0 \leq \omega_y \leq \omega_{yГР} \\ 0, & \text{если } \omega_x > \omega_{xГР}, \omega_y > \omega_{yГР} \end{cases}. \quad (13)$$

Используя (13), а также уравнение спектра регуляризованного решения в методе А. Н. Тихонова (2), можно показать, что

$$m_2^2 = 4 \int_0^{\omega_{xГР}} \int_0^{\omega_{yГР}} \frac{|\Phi(\omega_x, \omega_y, H)|^2}{[\alpha + |\Phi(\omega_x, \omega_y, H)|^2]^2} \cdot L \cdot d\omega_x d\omega_y. \quad (14)$$

При применении регуляризации по методу М. М. Лаврентьева аналогичное уравнение будет иметь вид

$$m_2^2 = 4 \int_0^{\omega_{x_{ГР}}} \int_0^{\omega_{y_{ГР}}} \frac{1}{|\alpha + \Phi(\omega_x, \omega_y, H)|^2} \cdot L \cdot d\omega_x d\omega_y. \quad (15)$$

Характеристика «белого» шума находится из уравнения

$$\delta T^2 = 4 \int_0^{\omega_{x_{ГР}}} \int_0^{\omega_{y_{ГР}}} L \cdot d\omega_x d\omega_y, \quad (16)$$

решение которого относительно L приводит к

$$L = \frac{\delta T^2}{4 \cdot \omega_{x_{ГР}} \cdot \omega_{y_{ГР}}}, \quad (17)$$

δT – средняя квадратическая ошибка исходной функции аномальной части вертикального градиента силы тяжести T_{ZZ} .

Используя уравнения (10), (11), (14), (15), получим априорные оценки величин m_1 и m_2 для методов регуляризации А. Н Тихонова и М. М. Лаврентьева. Для оценочных расчетов выберем спокойный в гравиметрическом отношении район Земли, который характеризуется дисперсией поля аномалий силы тяжести $m_{\Delta g}^2$ равной 200 Гол². Радиус корреляции поля аномалий силы тяжести примем равным 50 км, что соответствует параметру $\mu = 36.7$ км. Высоту H пересчета исходных данных зададим 200 км, а среднюю квадратическую ошибку исходной функции аномальной части вертикального градиента силы тяжести примем равной

Таблица 1

Значения средних квадратических ошибок аномалий силы тяжести при различных значениях параметра регуляризации (метод регуляризации А. Н. Тихонова)

Значение параметра регуляризации	Значение средних квадратических ошибок аномалий силы тяжести
10^{-12}	13
10^{-11}	6
10^{-10}	6
10^{-9}	8
10^{-8}	9
10^{-7}	11
10^{-6}	12

Таблица 2

Значения средних квадратических ошибок аномалий силы тяжести при различных значениях параметра регуляризации (метод регуляризации М. М. Лаврентьева)

Значение параметра регуляризации	Значение средних квадратических ошибок аномалий силы тяжести
10^{-7}	158
10^{-6}	28
10^{-5}	7
10^{-4}	9
10^{-3}	12
10^{-2}	13
10^{-1}	13

$5 \cdot 10^{-4} E (1E = 10^{-9} \frac{1}{c^2})$. Устойчивое решение задачи будем искать при значениях параметра регуляризации α от 10^{-30} до 10^{-1} .

Некоторые результаты выполненных расчетов систематизированы в таблицах 1 и 2.

Анализ полученных результатов показывает, что при $\alpha \rightarrow 0$, искажения, вносимые регуляризацией, также стремятся к нулю, а величина шума регуляризованного решения быстро возрастает. При большом значении параметра α наблюдается обратная ситуация. И лишь при некоторых α , близких к оптимальному, ошибки m_1 и m_2 становятся примерно одинаковыми. Причем в этом случае суммарное влияние m_1 и m_2 , рассчитанное по формуле (5), не превышает 7 мГал. Следовательно, априорные оценки позволяют заключить, что и метод регуляризации А.Н. Тихонова, и метод регуляризации М.М. Лаврентьева способны обеспечить высокую точность восстановления аномалий силы тяжести на поверхности Земли по исходной спутниковой градиентометрической информации.

Следует обратить внимание и на то, что и тот и другой методы регуляризации дают решение с удовлетворительной точностью только в очень узком диапазоне параметров α . При этом, как следует из содержания таблиц 1 и 2, решение по А.Н. Тихонову менее чувствительно к погрешностям выбора параметра регуляризации.

Таким образом, априорные оценки показывают, что в основу разрабатываемых подходов к обработке спутниковой градиентометрической информации следует положить метод регуляризации А.Н. Тихонова.

Литература

1. Лаврентьев, М. М. О некоторых некорректных задачах математической физики / М.М. Лаврентьев. – Новосибирск, АН СССР, 1962. – 68 с.
2. Лаврентьев, М. М. О постановке некоторых некорректных задач математической физики / М.М. Лаврентьев, В.Г. Васильев // Сибирский математический журнал. – 1966. – Т. VII, № 3. – С. 559–576.
3. Левицкая, З. Н. Статистические модели аномальных характеристик гравитационного поля Земли / З.Н. Левицкая // Гравиметрические исследования на море. – 1988. – С. 26–46.
4. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
5. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 229 с.

Интеллектуализация геоинформационных систем

Geoinformation systems intellectualization

Камынина / Kamynina N.

Надежда Ростиславовна

(ur@miigaik.ru)

кандидат технических наук.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК),
и.о. ректора.

г. Москва

Непоклонov / Nepoklonov V.

Виктор Борисович

(vbnep@miigaik.ru)

доктор технических наук, профессор.

МИИГАиК,

проректор по научной работе.

г. Москва

Шлапак / Shlapak V.

Василий Викторович

(geofak@miigaik.ru)

кандидат технических наук, доцент.

МИИГАиК,

декан геодезического факультета.

г. Москва

Лонский / Lonskiy I.

Иван Иванович

(lonski@inbox.ru)

кандидат технических наук, доцент,

действительный член МАИ.

МИИГАиК,

заведующий кафедрой прикладной информатики,

профессор.

г. Москва

Лотова / Lotova K.

Ксения Сергеевна

(aksi_malyutka@mail.ru)

МИИГАиК,

магистрант.

г. Москва

Ключевые слова: геоинформационная система – geoinformation system; модель – model; иерархия – hierarchy; вектор – vector.

Рассмотрены геоинформационные системы (ГИС) как источник геопространственной информации для процесса принятия решений, эффективность менеджмента при использовании ГИС, применение экспертной системы для повышения эффективности ГИС на основе анализа локальных баз данных тематического слоя и на основе анализа изображения тематического слоя, база знаний, векторно-иерархический подход, проекция вектора цели на тезаурус информационной системы.

Geoinformation systems (GIS) are considered as a source of geospatial information for the decision making process, management effectiveness in the use of GIS, application of the expert system for increasing the effectiveness of GIS based on the analysis of the local data-bases of the thematic layer and based on the analysis of the thematic layer image, knowledge base, vector-hierarchical approach, projection of the target vector onto the thesaurus of the information system.

Ведение

Современные геоинформационные системы (ГИС) нашли широкое применение в технологии создания цифровых электронных карт, а также в технологии создания кадастровых карт и планов, создании тематических карт в газовой промышленности, в разработке и эксплуатации карт расположения сети телекоммуникаций, в сельском хозяйстве и находят применение во всех областях, связанных с геопространственным данными [1–4]. Помимо этого наметилась тенденция использования ГИС в качестве рабочего места управленца. Рассмотрим более подробно этот вариант применения ГИС [5, 6].

Менеджмент на основе ГИС

Эффективность менеджмента имеет два важных измерения – результативное и экономическое. Результативное измерение сообщает о том, насколько успешно выполняются поставленные задачи в области обеспечения необходимого объёма производства, продаж и других маркетинговых задач. А экономическое изме-

рение сообщает о том, насколько затратным является такой способ достижения поставленных целей [7].

Следует отметить, что эффективность менеджмента зависит от его информационного обеспечения. Принятие решений является важной частью любой управленческой деятельности [8, 9]. Грамотное управленческое решение может быть принято лишь при условии наличия у управленца необходимой и достаточной информации, а также при наличии у него необходимой квалификации, в том числе в отношении использования соответствующего информационного и программного обеспечения. Эффективность менеджмента, выполняемого с помощью ГИС, определяется также наличием полной, достоверной и точной геопространственной информации.

ГИС являются средством накопления, обработки, анализа, представления и отображения геопространственных данных. Визуализация с помощью ГИС пространственных данных позволяет оценивать большой объем данных в совокупности, что невозможно при изучении и анализе данных, хранящихся в таблицах. ГИС – это не инструмент для выдачи решений, а средство, помогающее ускорить и повысить эффективность процедуры принятия решений, обеспечивающее ответы на запросы и функции анализа пространственных и атрибутивных данных, представления результатов анализа в наглядном и удобном для восприятия виде.

При использовании ГИС требуемая для принятия решений информация может быть представлена в лаконичной картографической форме с дополнительными текстовыми пояснениями, графиками, диаграммами и мультимедийными вставками. ГИС позволяет значительно облегчить процесс выбора управленческого решения. Наличие доступной для восприятия и обобщения информации позволяет ответственным работ-

никам сосредоточить свои усилия на поиске решения, не тратя значительного времени на сбор и осмысливание разнородных данных. Можно достаточно быстро рассмотреть несколько вариантов решения и выбрать наиболее эффективный.

Основой эффективного функционирования любой ГИС является наличие необходимых достоверных исходных данных. Точность и достоверность получаемых ГИС данных в значительной мере зависит от качества исходной картографо-геодезической информации. Для принятия с помощью ГИС грамотных и квалифицированных решений должны быть обеспечены надежность и качество исходных картографо-геодезических материалов. Повышение качества картографо-геодезического обеспечения ГИС позволяет повышать эффективность управленческих решений, связанных с геопространственными данными.

Сбор данных для наполнения ГИС – один из наиболее важных этапов создания ГИС. От точности, достоверности и актуальности собранных данных зависит эффективность и качество функционирования геоинформационной системы [10]. Для формирования входных данных и обновления базы данных ГИС нужны различные виды геодезической, картографической и сопутствующей информации, в том числе результаты геодезических измерений, служащие основой для координатной привязки пространственных объектов (процессов), исследуемых и анализируемых с использованием ГИС.

Экспертные системы

Визуализация с помощью ГИС пространственных данных позволяет оценивать большой объем данных. Однако необходима количественная оценка и анализ визуализированной информации. Значительно повысить

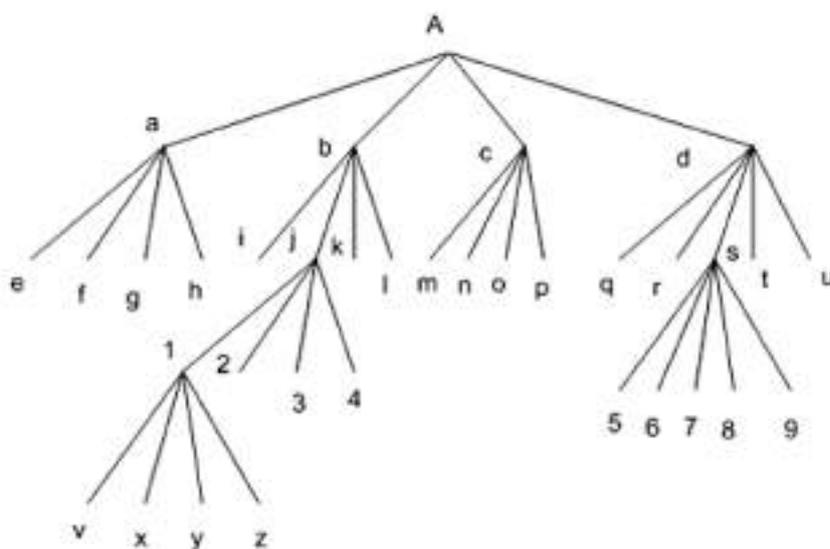


Рис. 1. Иерархическая модель базы знаний экспертной системы

эффективность менеджмента могут ГИС в сочетании с элементами искусственного интеллекта, а именно экспертными системами. Экспертные системы нужны для оценки текущей ситуации, для прогнозирования неблагоприятных ситуаций или наоборот ситуаций, ведущих к максимальной результативности деятельности, а также для построения информационно-справочной системы, позволяющей управленцу иметь варианты возможного решения с весовыми коэффициентами. Экспертные системы для ГИС можно проектировать на основе баз данных объектов тематического слоя, на основе анализа изображения тематического слоя и распознавания образов на тематическом слое и экспорта пространственных данных интерактивно выделенных пользователем объектов слоя с последующим анализом. Для реализации экспертных систем, работающих совместно с ГИС, необходима разработка программного обеспечения, работающего с базами данных ГИС и изображениями слоев.

База знаний

При проектировании экспертной системы наиболее важное значение имеет подбор правил для базы знаний. База знаний может основываться на правилах и фактах теоретического, практического или теоретико-практического характера.

Наибольшую ценность представляют факты и правила, которые позволяют реализовать экспертной системе целевую функцию. Векторно-иерархический подход позволяет оценить возможности тезауруса базы знаний. Тезаурус – словарь, собрание сведений или свод, в полной мере охватывающие понятия, определения и термины специальной области знаний или сферы деятельности.

Иерархическая модель базы знаний может быть описана системой векторов:

$$\begin{aligned} A &= \{a, b, c, d\} & d &= \{q, r, s, t, u\} \\ a &= \{e, f, g, h\} & k &= \{1, 2, 3, 4\} \\ b &= \{i, j, k, l\} & s &= \{5, 6, 7, 8, 9\} \\ c &= \{m, n, o, p\} & l &= \{v, x, y, z\} \end{aligned}$$

Количество уровней иерархии базы знаний характеризует глубину проникновения в суть проблемы, детализацию решаемой задачи. Количество компонент вектора верхнего уровня характеризует широту охвата проблемы.

Тезаурус (база знаний) экспертной системы должен соответствовать решаемым задачам. Для достижения цели информационная система должна решить ряд задач, которые в совокупности образуют вектор цели. Целевая функция может быть представлена вектором, включающим такие компоненты задачи, решение которых приводит к достижению цели.

При наличии проекции вектора цели на вектор тезауруса можно говорить о возможности решения информационной системой конкретных задач, приводящих к достижению цели, т.е. наличие в тезаурусе необходимых понятий может приводить к достижению цели. Проекцией одного вектора на другой можно считать пересечение (совпадение) некоторых составляющих. Если для конкретной информационной системы отсутствует проекция вектора цели на тезаурус системы, то информационная система не способна решить поставленную перед ней задачу и требуется либо обучение информационной системы, либо замена ее на другую. Если проекция вектора цели на тезаурус информационной системы имеет одну составляющую, то это один случай. Если проекция вектора цели на тезаурус информационной системы имеет несколько компонент, то это другой случай. Причем можно утверждать, что во втором случае возможности системы больше, чем в первом случае.

Такая векторно-иерархическая модель позволяет анализировать системы, работающие на основе знаний, выполнять сравнительную оценку их эффективности. Однако такая модель сугубо теоретическая. Практически любая информационная система, имеющая тезаурус, обладает лишь заскладрованными данными. Информационная система только тогда способна решать информационные задачи, когда в нее входят не только знания, но и навыки и умения, реализованные в виде алгоритмов решения конкретных задач. А навыки и умения являются знаниями по переработке исходных данных и знаний.

Представление информации в виде многомерного вектора позволяет оценивать не только информативность, но и выбирать правильную стратегию создания и накопления баз знаний в конкретной предметной области.

Рассмотренный векторно-иерархический подход позволяет сопоставлять объемы информации не на основе количественных характеристик, характеризующих объем информации, а на основе оценки количества компонент, соответствующих вектору цели или решаемой задаче, а также сопоставлять объемы различной информации.

Одним из направлений оптимизации базы знаний является ориентация на нормативную базу в предметной области. Представляется необходимым расширить область информации, которую принято считать знанием. Как минимум туда должны войти алгоритмы. В широком понимании знания это та информация, которой мы доверяем, т.е. считаем достоверной.

Заключение

Эффективность ГИС может быть повышена за счет их интеллектуализации на основе применения экспертных систем, позволяющих обеспечить разработку грамотных квалифицированных управленче-

ских решений. Перспективой является интеграция экспертных систем в оболочку ГИС. Этому способствует расширение области знаний путем отнесения к ней алгоритмов решения управленческих задач с использованием информации тематических слоев.

Литература

1. Журкин, И. Г. Геоинформационные системы / И.Г. Журкин, С.В. Шайтура. – М.: Кудиц-Пресс, 2009. – 272 с.
2. Кужелев, П. Д. Геоинформационный мониторинг на железнодорожном транспорте / П.Д. Кужелев // Науки о Земле. – 2014. – № 3. – С. 83–90.
3. Розенберг, И. Н. Геоинформационные системы: Учебное пособие / И.Н. Розенберг, В.Я. Цветков. – М.: МГУПС (МИИТ), 2015. – 97 с.
4. Булгаков, С. В. Особенности геоинформационного моделирования / С.В. Булгаков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 3. – С. 77–80.
5. Присяжнюк, С. П. Системы ГИС-3D для ситуационных аналитических центров / С.П. Присяжнюк, М.Ю. Порядин // Информация и Космос. – 2012. – № 1. – С. 52–57.
6. Присяжнюк, С. П. Геоинформационная система поддержки принятия решений и управления Соловецким архипелагом / С.П. Присяжнюк, И.А. Иванов, Д.В. Карманов // Информация и Космос. – 2014. – № 4. – С. 86–93.
7. Васин, С. М. Природа и сущность понятия эффективности системы управления предприятием / С.М. Васин, О.А. Мамонова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – С. 229–232.
8. Лонский, И. И. Применение ГИС для прогнозирования ситуаций и принятия управленческих решений / И.И. Лонский, Д.А. Назаренко // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 4. – С. 119–126.
9. Лонский, И. И. Необходимость и целесообразность применения сетевых ГИС-технологий для решения задач градостроительного кадастра / И.И. Лонский, Д.А. Назаренко // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 4. – С. 127–133.
10. Непоклонов, В. Б. Эффективность картографо-геодезического обеспечения ГИС / В.Б. Непоклонов, И.И. Лонский, В.В. Шлапак // Информация и Космос. – 2016. – № 1. – С. 86–91.

Оценка качества аэрофотосистем дистанционного зондирования Земли с использованием частотно-колориметрического показателя

Assessment of the aerial photosystems quality for remote sensing of the Earth using a frequency-colorimetric indicator

Молчанов / Molchanov A.

Андрей Сергеевич

(9171900070@rambler.ru)

кандидат технических наук.

Государственный летно-испытательный

центр им. В. П. Чкалова,

заместитель начальника отдела.

г. Ахтубинск

Ключевые слова: аэрофотосистема – aerial photo-system; оценка качества – quality control; частотно-колориметрический показатель – frequency-colorimetric indicator; фотоизображение – photographic images; дистанционное зондирование Земли – remote sensing of the Earth.

В статье рассмотрена возможность применения частотно-колориметрического показателя для оценки цветных фотографических изображений, полученными аэрофотосистемами дистанционного зондирования Земли. В качестве численного значения частотно-колориметрического показателя предлагается использовать пороговую величину цветового различия между объектом и фоном.

The possibility of using a frequency-colorimetric indicator for estimating color photographic images obtained by aerial photosystems of remote sensing of the Earth is considered in the article. As a numerical value of the frequency-colorimetric indicator, it has been proposed to use the threshold value of the color difference between the object and the background.

Одной из основных задач, стоящих перед комплексами и средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), имеющими в своем составе аэрофотосистемы (АФС), предназначенные для выполнения воздушного аэрофотографирования, является своевременное вскрытие (выявление) объектов на заданном фоне подстилающей поверхности. Обнаружение и распознавание объекта выполняется по получаемому АФС изображению и в значительной степени зависит от качества изображения. В части решения задач воспроизведения изображений, под качеством АФС понимается способность воспроизводить без искажений спектры входных сигналов в требуемых диапазонах пространственных

частот. Качество АФС существенным образом влияет на эффективность АФС, поэтому для их оценки необходимо использовать показатели, которые были связаны с показателями эффективности АФС [1].

Недостатком и сложностью основных показателей оценки качества АФС, является то, что эти оценки получены при соблюдении определенной совокупности условий проведения эксперимента. Изменение одного или нескольких из них, например времени аэрофотографирования или характеристик аэроландшафта, может существенно повлиять на вероятность вскрытия объекта дешифрирования. Говоря о вероятностях обнаружения и распознавания объектов, нужно всегда оговаривать условия, в которых АФС оценивалась. Существующие показатели оценки качества АФС не в полной мере позволяют сопоставить различные АФС, использующие различные аэрофотомаатериалы и определить, какая из них наиболее пригодна для решения поставленной задачи [2].

Существующие методы оценки предусматривают аэрофотографирование (получение изображения) одного и того же участка аэроландшафта с расположенными на нем тестобъектами. Затем группа дешифровщиков определяет по действующим методикам величину разрешающей способности АФС и дает экспертную оценку качества. Оценка АФС по значению разрешающей способности ориентирована на конечные результаты работы системы и мало пригодна для анализа работы АФС. К недостаткам оценки качества АФС по величине разрешающей способности следует отнести ее субъективный характер, так как разрешающая способность оценивается дешифровщиком. При этом ошибка дешифровщика, в сознании которого еще не установился четкий критерий разрешения, достигает 40 % [1, 3, 4].

Одним из показателей при оценке цветных изображений может стать величина цветового различия между

объектом и фоном в равноконтрастной системе, рекомендованной к применению Международной колориметрической организацией (МКО). В основе этого показателя лежит система координат цвета, в которой равным отрезкам линии, проведенной между точками, изображающими любые два цвета, соответствовали бы равные цветовые контрасты – равные числа порогов [5]. Два излучения, имеющие разные координаты цвета, воспринимаются глазом как разноцветные, если разница в цвете равна или больше порога цветоразличения. Пороговую разность цвета можно представить в пространстве в виде расстояния между концами векторов двух цветов, различаемых с заданной вероятностью. Чем больше это расстояние, тем больше их различие, и цвета становятся более контрастными. В этом смысле пороговую разность цвета принято называть цветовым порогом, а сверхпороговое различие, выраженное минимальным числом цветовых порогов, – цветовым контрастом.

В настоящее время применяется равноконтрастная модель системы МКО – 1976 $L^*a^*b^*$. Цветовое пространство $L^*a^*b^*$ определяется тремя координатами $L^*a^*b^*$. Где L^{**} – светлота, a^* – красно-зеленые цвета и b^* – желто-синие цвета.

В цветовом пространстве МКО $L^*a^*b^*$ каждому цвету соответствует точка, положение которой определяется тремя независимыми координатами: светлотой – L^* и двумя хроматическими координатами – a^* и b^* , связанными с координатами цвета X, Y, Z . Числовые значения цветового различия могут быть определены [5, 6]:

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}}, \quad (1)$$

где $L^*a^*b^*$ – координаты цвета равноконтрастного цветового пространства;

$$\begin{aligned} \Delta a^* &= a_{об}^* - a_{ф}^* \\ \Delta b^* &= b_{об}^* - b_{ф}^* \\ \Delta L &= L_{об}^* - L_{ф}^* \end{aligned} \quad (2)$$

где «об» и «ф» – индексы цветовых координат объекта и фона соответственно.

Цветовые координаты можно определить [4, 5]:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{y}{y_0} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\left(\frac{x}{x_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{y}{y_0} \right)^{1/3} \right], \\ b^* &= 200 \left[\left(\frac{y}{y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/3} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты цвета идеального рассеивателя для выбранного стандартного источника освещения.

Координаты x, y, z определяются из соотношений [4, 6]:

$$\begin{aligned} x &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda \\ y &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \\ z &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

где λ – длина волны, $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение энергии источника света, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – ординаты кривых сложения цветов в системе XYZ , $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания образца.

В перцептивно-равномерном пространстве Евклидово расстояние будет обеспечивать хорошее измерение воспринимаемого цветового различия. Тем не менее неравномерности МКО $L^*a^*b^*$ приводят к изменениям в соответствии восприятия к ΔE_{ab}^* в различных частях цветового пространства.

В 1994 году МКО предложила пересмотренную формулу цветового различия, которая включает в себя поправку на неравномерность CIE LAB (CIE, 1995). МКО 1994 цветовое различие, ΔE_{94}^* , определяется по формуле:

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{K_H S_H} \right)^2}, \quad (5)$$

где $\Delta L^*, \Delta C_{ab}^*, \Delta H_{ab}^*$ являются соответственно, различиями по светлоте, насыщенности и цветовому тону между испытуемым и стандартным образцами. S_L, S_C, S_H – длины полуосей эллипсоида, именуемые весовыми функциями, позволяющими регулировать их соответствующие составляющие, следуя местоположению образца цвета в цветовом пространстве Lab , $K_L=1, K_C=1, K_H=1$ – взвешивающие коэффициенты по умолчанию, $K_L=1, K_C=0.045, K_H=0.015$ – для графики и полиграфии, $K_L=1, K_C=0.048, K_H=0.014$ – для текстильной промышленности.

Альтернативная формулировка цветового различия выражается через разницу в светлоте ΔL^* , насыщенности ΔC_{ab}^* и оттенка ΔH_{ab}^* .

Дальнейшие попытки улучшить равномерность для формулы цветового различия построены в виде CIEDE2000. Помимо насыщенности и тоновых весовых значений функций, используемых в CIE94, CIEDE2000 включает в себя ряд дополнительных параметров, которые помимо разницы цветовых координат $\Delta L^*, a^*$ и b^* цветового пространства CIE $L^*a^*b^*$ также учитывают разницу между координатами цветности H° и насыщенности C^* цветового пространства CIE LCH [5]:

$$\Delta E_{2000} = \left[\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H} \right)^2 + R_\phi \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right) + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H} \right) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

Тем не менее улучшения, достигнутые за счет применения более продвинутой коррекции в формуле, оказались незначительными по сравнению с улучшениями в CIE94 формуле. Поздние исследования доказали наличие систематических погрешностей в текущей CIEDE2000 формуле и не подтвердили ее преимущества перед CIE94 цветовым различием.

В настоящее время кроме перечисленных выше, существует большое количество дополнительных оценок цветового различия. На практике выбор единиц измерения, цветового пространства и значений цветового различия основывается на пяти основных правилах Бильмаера [7]:

- выбрать единый метод измерений и использовать его постоянно;
- всегда точно знать условия проведения измерений;
- никогда не пытаться конвертировать цветовые различия, сделанные по другим расчетным формулам;
- использовать цветовые различия только как первое приближение к установленной разнице до тех пор, пока они не будут подтверждены визуально;
- всегда помнить, что заказчик не будет принимать или отбраковывать цвет по цифрам – для него главное зрительное восприятие.

Поскольку АФС можно рассматривать как фильтр пространственных частот, то естественно предположить, что цветовые различия между объектом и фоном на выходе оптической системы будут зависеть от геометрических размеров изображения. Поэтому для более полной оценки качества АФС, с получением цветных изображений, необходимо учитывать зависимость получаемых цветовых различий от пространственной частоты [2, 8, 9].

Цветовые координаты изображений объектов и фонов, образованных красителями цветного изображения и имеющих спектральные коэффициенты отражения $\tau_{об(ф)}(\lambda)$ и $\tau_{ф}(\lambda)$, в системе XYZ могут быть представлены [6]:

$$\left. \begin{aligned} X_{об(ф)} &= \int_{380}^{770} \Phi_{ελ}(\lambda)x(\lambda)\tau_{об(ф)}(\lambda)d\lambda \\ Y_{об(ф)} &= \int_{380}^{770} \Phi_{ελ}(\lambda)y(\lambda)\tau_{об(ф)}(\lambda)d\lambda \\ Z_{об(ф)} &= \int_{380}^{770} \Phi_{ελ}(\lambda)z(\lambda)\tau_{об(ф)}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \right\} (7)$$

где 380...770 нм – пределы интегрирования определяющие видимый диапазон спектра, индексы "об(ф)" обозначают, что данная величина может описывать характеристики изображения как объекта, так и фона.

В общем случае величины $\tau_{об}(\lambda)$, $\tau_{ф}(\lambda)$ являются функциями пространственных координат «m» и «n» и выражения (7) могут быть записаны:

$$\left. \begin{aligned} X_{об(ф)}(m,n) &= \int_{380}^{770} \Phi_{ελ}(\lambda)x(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda \\ Y_{об(ф)}(m,n) &= \int_{380}^{770} \Phi_{ελ}(\lambda)y(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda \\ Z_{об(ф)}(m,n) &= \int_{380}^{770} \Phi_{ελ}(\lambda)z(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda \end{aligned} \right\} (8)$$

Таким образом, величины $\tau_{об}$ и $\tau_{ф}$ являются функциями трех переменных – λ, m, n .

Используя закон аддитивности координат цвета [10], условно разобьем оптический диапазон видимого спектра, воспроизводимого каналами ФППЗ, на три участка $\lambda_1 \dots \lambda_2, \lambda_2 \dots \lambda_3, \lambda_3 \dots \lambda_4$. Практически участки (или зоны) разбиения оптического диапазона соответствуют зонам поглощения желтого, пурпурного и голубого красителей. Тогда выражения (8) можно переписать в виде:

$$\left. \begin{aligned} X_{об(ф)}(m,n) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{x}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda + \\ &+ \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{x}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda + \\ &+ \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{x}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda \\ Y_{об(ф)}(m,n) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda + \\ &+ \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda + \\ &+ \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda \\ Z_{об(ф)}(m,n) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{z}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda + \\ &+ \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{z}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda + \\ &+ \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \Phi_{ελ}(\lambda)\bar{z}(\lambda)\tau_{об(ф)}(m,n,\lambda)d\lambda \end{aligned} \right\} (9)$$

В подынтегральные выражения (9) входит функция с тремя переменными. Для упрощения выражений (9) необходимо сепарировать переменные в рассматриваемых нами участках спектра. С этой целью воспользуемся приведенной в [11] оптимальной схемой Гюбля. Идеализированная схема субтрактивного смещения цветов, предложенная Гюблем, предусматривает три фильтра, имеющих коэффициент пропускания теоретически равный нулю в зоне поглощения и единице в зонах пропускания (рис. 1). Парная комбинация таких фильтров, названных оптимальными фильтрами вследствие наибольшего их коэффициента пропускания для заданной результирующей цветности,

обеспечивает наиболее чистые цвета субтрактивной смеси: красный, синий, зеленый.

Совокупность трех оптимальных фильтров идеализированной системы Гюбля с одинаковой концентрацией поглощающего вещества в каждой полосе трансформирует исходный белый цвет в черный или серый в зависимости от концентрации поглощающих веществ. Совокупность трех оптимальных фильтров создает хроматические цвета, разбавленные белым.

Координаты цвета излучения в пределах каждого участка видимого спектра определяются функцией спектральной плотности излучения белого исходного цвета и их можно представить:

$$X^c = \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda)x(\lambda)d\lambda, X^3 = \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda)x(\lambda)d\lambda, X^k = \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda)x(\lambda)d\lambda, \quad (10)$$

$$Y^c = \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda)y(\lambda)d\lambda, Y^3 = \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda)y(\lambda)d\lambda, Y^k = \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda)y(\lambda)d\lambda, \quad (11)$$

$$Z^c = \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda)z(\lambda)d\lambda, Z^3 = \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda)z(\lambda)d\lambda, Z^k = \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda)z(\lambda)d\lambda, \quad (12)$$

где $X^c, X^3, X^k, Y^c, Y^3, Y^k, Z^c, Z^3, Z^k$ – координаты цвета в системе XYZ в синей, зеленой и красной зонах спектра.

Так как цвет смеси выражается через сумму координат смешиваемых цветов, координаты результирующего цвета при использовании оптимальных фильтров могут быть выражены:

$$\left. \begin{aligned} X &= \tau^{\text{ж}} \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda)x(\lambda)d\lambda + \tau^{\text{п}} \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda)x(\lambda)d\lambda + \\ &+ \tau^{\text{г}} \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda)x(\lambda)d\lambda \\ Y &= \tau^{\text{ж}} \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda)y(\lambda)d\lambda + \tau^{\text{п}} \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda)y(\lambda)d\lambda + \\ &+ \tau^{\text{г}} \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda)y(\lambda)d\lambda \\ Z &= \tau^{\text{ж}} \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda)z(\lambda)d\lambda + \tau^{\text{п}} \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda)z(\lambda)d\lambda + \\ &+ \tau^{\text{г}} \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda)z(\lambda)d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $\tau^{\text{ж}}, \tau^{\text{п}}, \tau^{\text{г}}$ – коэффициенты оптической плотности желтого, пурпурного и голубого цвета в синей, зеленой и красной зонах спектра.

Как видно из выражений (13), идеализированная субтрактивная система тождественна аддитивной системе с основными цветами излучений, имеющими спектральное распределение такое же, как исходный

белый в синей, зеленой и красной зонах спектра. Из этого следует, что любому заданному цвету соответствует вполне определенная совокупность трех фильтров, однозначно характеризующих заданный цвет. Характеристики этих фильтров могут служить субтрактивными координатами заданного цвета. Субтрактивными координатами идеализированной системы могут служить оптические коэффициенты отражения каждого цвета $\tau^{\text{ж}}, \tau^{\text{п}}, \tau^{\text{г}}$ или оптические плотности $D^{\text{ж}}, D^{\text{п}}, D^{\text{г}}$ или коэффициенты яркости на экране монитора для аддитивных координат заданного цвета.

Таким образом, любой цвет, образуемый красителями изображения, можно выразить, пользуясь схемой Гюбля, через коэффициенты отражения $\tau^{\text{ж}}, \tau^{\text{п}}, \tau^{\text{г}}$, оптические плотности $D^{\text{ж}}, D^{\text{п}}, D^{\text{г}}$ каждого из участков диапазона. Для определения величин $\tau^{\text{ж}}, \tau^{\text{п}}, \tau^{\text{г}}$ выражений (13) необходимо решить линейную систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} X &= \tau^{\text{ж}} X^c + \tau^{\text{п}} X^3 + \tau^{\text{г}} X^k \\ Y &= \tau^{\text{ж}} Y^c + \tau^{\text{п}} Y^3 + \tau^{\text{г}} Y^k \\ Z &= \tau^{\text{ж}} Z^c + \tau^{\text{п}} Z^3 + \tau^{\text{г}} Z^k \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Решаем систему с помощью определителей:

$$\Delta = \begin{bmatrix} X^c & X^3 & X^k \\ Y^c & Y^3 & Y^k \\ Z^c & Z^3 & Z^k \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\Delta \tau^{\text{ж}} = \begin{bmatrix} X & X^3 & X^k \\ Y & Y^3 & Y^k \\ Z & Z^3 & Z^k \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\Delta \tau^{\text{п}} = \begin{bmatrix} X^c & X & X^k \\ Y^c & Y & Y^k \\ Z^c & Z & Z^k \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\Delta \tau^{\text{г}} = \begin{bmatrix} X^c & X^k & X \\ Y^c & Y^k & Y \\ Z^c & Z^k & Z \end{bmatrix}, \quad (18)$$

Откуда находим $\tau^{\text{ж}} = \frac{\Delta \tau^{\text{ж}}}{\Delta}$, $\tau^{\text{п}} = \frac{\Delta \tau^{\text{п}}}{\Delta}$, $\tau^{\text{г}} = \frac{\Delta \tau^{\text{г}}}{\Delta}$ и, вычислив $X^c, X^3, X^k, Y^c, Y^3, Y^k, Z^c, Z^3, Z^k$ окончательно получаем при выбранных границах участков разбиения видимого спектра:

$$\left. \begin{aligned} \tau^{\text{ж}} &= 1,97 \cdot 10^{-3} X - 3,45 \cdot 10^{-3} Y + 31,74 \cdot 10^{-3} Z \\ \tau^{\text{п}} &= 15,10 \cdot 10^{-3} X + 26,3 \cdot 10^{-3} Y + 0,75 \cdot 10^{-3} Z \\ \tau^{\text{г}} &= 14,90 \cdot 10^{-3} X - 5,58 \cdot 10^{-3} Y - 2,14 \cdot 10^{-3} Z \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

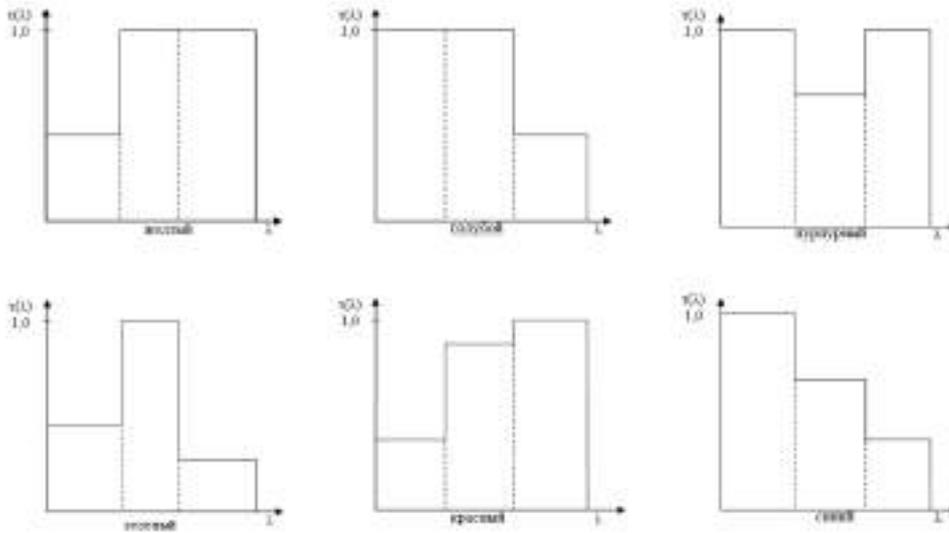


Рис. 1. Оптимальные фильтры Гюбля

Таким образом, коэффициенты отражения в трех выбранных зонах спектра могут быть вычислены с помощью измеренной величины $\tau(\lambda)$:

$$\left. \begin{aligned}
 \tau^* &= 1,97 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda - \\
 &- 3,45 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda + \\
 &+ 31,74 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda \\
 \tau^n &= -15,10 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) x(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda + \\
 &+ 26,30 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda + \\
 &+ 0,76 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda \\
 \tau^r &= 14,90 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda - \\
 &- 5,58 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda - \\
 &- 2,14 \cdot 10^{-3} \int_{380}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \right\} (20)$$

Оптические плотности D^*, D^n, D^r в синей, зеленой и красной зонах спектра могут быть получены путем прямого измерения оптических плотностей денситометром в трех зонах спектра (зональных оптических плотностей):

$$D = -lq\tau, \quad (21)$$

Учитывая, что цветовые координаты XYZ цветного изображения являются функциями пространственных координат m, n , выражение (9) с учетом (20) можно записать:

$$\left. \begin{aligned}
 X_{об(ф)}^*(m, n) &= \tau_{об(ф)}^*(m, n) \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda + \\
 &+ \tau_{об(ф)}^n(m, n) \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda + \\
 &+ \tau_{об(ф)}^r(m, n) \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y_{об(ф)}^*(m, n) &= \tau_{об(ф)}^*(m, n) \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda + \\
 &+ \tau_{об(ф)}^n(m, n) \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda + \\
 &+ \tau_{об(ф)}^r(m, n) \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z_{об(ф)}^*(m, n) &= \tau_{об(ф)}^*(m, n) \int_{380}^{500} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda + \\
 &+ \tau_{об(ф)}^n(m, n) \int_{500}^{570} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda + \\
 &+ \tau_{об(ф)}^r(m, n) \int_{570}^{770} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \right\} (22)$$

Полученные выражения (22) полностью соответствуют третьему закону Гроссмана, согласно которому один и тот же цвет может иметь излучение различных спектральных составов (свойство метамеризма) [5].

Обозначая величины интегралов буквами a_1, a_2, \dots, a_9 , выражения (22) можно записать в компактной матричной форме:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{об}(\phi)}(m, n) \\ Y_{\text{об}(\phi)}(m, n) \\ Z_{\text{об}(\phi)}(m, n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{\text{об}(\phi)}^*(m, n) \\ \tau_{\text{об}(\phi)}^n(m, n) \\ \tau_{\text{об}(\phi)}^r(m, n) \end{bmatrix} \quad (23)$$

Так как функция $\tau_{\text{об}(\phi)}^{*n,r}(m, n)$ непрерывна или имеет конечное число разрывов, и кроме того, имеет конечное число максимумов и минимумов в пределах изменения пространственных координат, то к ней может быть применено прямое Фурье-преобразование. Считая ФППЗ пространственно изотропным (имеющим одинаковые физические свойства по всем направлениям) ($v = \sqrt{m^2 + n^2}$), перейдем к пространственно-частотным координатам цвета:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Y_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Z_{\text{об}(\phi)}(v) \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} F[\tau_{\text{об}(\phi)}^*(v)] \\ F[\tau_{\text{об}(\phi)}^n(v)] \\ F[\tau_{\text{об}(\phi)}^r(v)] \end{bmatrix} \quad (24)$$

где A – матрица коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_9 .

На спектр выходного сигнала будет оказывать влияние ФПМ каналов ФППЗ. Для определения цветовых координат, как функции пространственной частоты, необходимо спектр сигнала $F[\tau_{\text{об}(\phi)}^{*n,r}(v)]$ умножить на ФПМ ФППЗ $W_{\text{ФППЗ}}(v)$. Учитывая, что цветовые координаты XYZ цветного изображения являются функциями пространственных координат, и применяя прямое Фурье-преобразование, выражение (24) можно записать:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Y_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Z_{\text{об}(\phi)}(v) \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} F[\tau_{\text{об}(\phi)}^*(v)] \\ F[\tau_{\text{об}(\phi)}^n(v)] \\ F[\tau_{\text{об}(\phi)}^r(v)] \end{bmatrix} \cdot W_{\text{ФППЗ}}(v), \quad (25)$$

Учитывая выражение (25), которое позволяет найти пространственно-частотные координаты объекта и фона и, умножив спектры сигнала на ФПМ ФППЗ, выраженные через модуляции экспозиций и спектры входных сигналов ФПМ АФС, выражение (2) можно записать:

$$\Delta E^*(v) = \sqrt{[\Delta a^*(v)]^2 + [\Delta b^*(v)]^2 + [\Delta L^*(v)]^2}, \quad (26)$$

При этом выражение (25), используемое для определения цветовых координат, может быть записано применительно ко всей АФС:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Y_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Z_{\text{об}(\phi)}(v) \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} F[\tau_{\text{об}(\phi)}^*(v)] \\ F[\tau_{\text{об}(\phi)}^n(v)] \\ F[\tau_{\text{об}(\phi)}^r(v)] \end{bmatrix} \cdot W_{\text{АФС}}(v), \quad (27)$$

где $W_{\text{АФС}}(v) = W_{\text{ФППЗ}}(v) \cdot W_{\text{АФС-ФППЗ}}(v)$ – ФПМ АФС.

Переходя к пространственно-частотным координатам цветности a^* и b^* выражения (4), можно убедиться, что ФПМ АФС на них влияния не оказывает, и они полностью определяются спектром сигнала и ФПМ каналов ФППЗ. Если в АФС используется черно-белый ФППЗ, то значение величины цветового различия может быть определено как:

$$\Delta E^*(v) = 116 W_{\text{ФППЗ}}^{1/3}(v) W_{\text{АФС-ФППЗ}}^{1/3}(v) \left[\tau_{\text{об}}(v)^{1/3} - [\tau(v)]^{1/3} \right], \quad (28)$$

Расчет величины цветового различия для АФС, использующих спектрально-зональные ФППЗ, может проводиться с учетом выражения (27) по выражениям (1, 3).

Если ставится задача только проведения ранжировки спектрально-зональных ФППЗ, выбора наилучшей из них по максимальной величине $\Delta E^*(v)$, то нет смысла проводить вычисления пространственного спектра объекта и фона. Для этой цели в качестве входного сигнала целесообразно использовать сигнал типа «белый шум». В этом случае размерность показателя $\Delta E^*(v)$ не изменяется.

Полученное выше выражение (27) пригодно и для расчета величины цветового различия АФС, работающих в двух различных каналах со спектрально-зональным ФППЗ. Для этого цветовые координаты объекта и фона могут быть определены:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Y_{\text{об}(\phi)}(v) \\ Z_{\text{об}(\phi)}(v) \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} F[\tau_{\text{об}(\phi)}^n(k)] \cdot W_{\text{ФППЗ}}^n(v) \\ F[\tau_{\text{об}(\phi)}^r(k)] \cdot W_{\text{ФППЗ}}^r(v) \end{bmatrix} \cdot W_{\text{АФС-ФППЗ}}(v), \quad (29)$$

где $A = \begin{bmatrix} a_2 a_3 \\ a_5 a_6 \\ a_8 a_9 \end{bmatrix}$ – матрица коэффициентов для двух каналов.

Если рассматривать черно-белый ФППЗ, в которой во всех трех зонах спектра количество цвета одинаковое (то есть $\tau^* = \tau^n = \tau^r$) и $W_{\text{ФППЗ}}^n(v) = W_{\text{ФППЗ}}^*(v) = W_{\text{ФППЗ}}^r(v)$, то можно получить значение величины цветового различия для черно-белого ФППЗ:

$$\Delta E^*(v) = 116 W_{\text{ФППЗ}}^{1/3}(v) \left| \left\{ F[\tau_{\text{об}}(v)]^{1/3} - \left\{ F[\tau_{\phi}(v)] \right\}^{1/3} \right\} \right|, \quad (30)$$

При условии использования сигнала типа «белый шум», можно получить:

$$\Delta E^*(v) = 116 W_{\text{ФППЗ}}^{1/3}(v) \left[\tau_{\text{об}}(v)^{1/3} - [\tau_{\phi}(v)]^{1/3} \right], \quad (31)$$

где $W_{\text{ФППЗ}}(v)$ – ФПМ черно-белого ФППЗ.

Разработанный частотно-колориметрический пока-

затель позволяет сопоставлять и сравнивать между собой различные ФППЗ – чем больше величина $\Delta E^*(v)$ в пределах требуемого диапазона пространственных частот, тем лучше рассматриваемый ФППЗ.

Таким образом, определенный для спектрональных и черно-белых ФППЗ численный показатель качества может использоваться для оценки и ранжировки АФС, в которых эти ФППЗ применяются. Однако использовать полученные выражения надо осторожно. Это обусловлено тем, что кривые сложения цветов определены для углов поля зрения 2° и 10° , что соответствует наблюдаемому объекту диаметром 9 мм и 45 мм с расстояния 25 см. Как уже упоминалось, при углах поля зрения менее 10° , зрение человека становится ахроматическим, а механизм этого изменения недостаточно изучен и формализован. И все же расчет частотно-колориметрического показателя возможен, если представить, что наблюдатель рассматривает пространственную синусоиду с углом поля зрения 2° . Данное условие не влияет на порядок ранжировки сравниваемых АФС, а с формальной точки зрения позволяет использовать колориметрические методы расчета.

Известно, что два цвета практически неразличимы при величине 4...6 ед. МКО. В качестве численного значения цветового различия предлагается использовать пороговую величину, равную 6 ед. МКО. Разработанный показатель цветового различия позволяет сопоставлять и сравнивать между собой различные АФС в пределах требуемого диапазона пространственных частот – чем больше величина ΔE^* , тем лучше рассматриваемая система при заданных условиях проведения летного эксперимента. Использование показателя по величине цветового различия наиболее полно учитывает особенности цветового зрения дешифровщика и позволяет сопоставлять цветные фотографические изображения при оценке качества АФС.

Литература

1. Ребрин, Ю. К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов / Ю.К. Ребрин – Киевское ВВАИУ, 1988. – 450 с.
2. Молчанов, А. С. Оценка фотографических изображений с использованием колориметрического показателя качества при проведении летных испытаний аэрофотосистем / А.С. Молчанов // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «X Научные чтения, посвященные памяти проф. Н. Е. Жуковского». – М.: Издательский дом Академия имени проф. Н. Е. Жуковского, 2013. – С. 258–260.
3. Карпович, И. Н. Военное дешифрирование аэрофото-снимков / И.Н. Карпович. – М.: Воениздат, 1990. – 544 с.
4. Дубинский, Г. П. Методы оценки качества оптических систем / Г.П. Дубинский, В.И. Кононов, А.Ф. Федоровский. – М.: Машиностроение, 1978. – 231 с.
5. Домасев, М. В. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения / М.В. Домасев, С.П. Гнатюк. – СПб.: ПИТЕР, 2003. – 224 с.
6. Луизов, А. В. Цвет и свет / А.В. Луизов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
7. Berns, R. Billmeyer and Saltzman's principles of color technology / R. Berns. – 3rd ed. p. cm. Includes bibliographical references and – 278 p.
8. Веселов, Ю. Г. Математическая модель аэрофотосистемы, построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда / Ю.Г. Веселов, В.А. Глушко, А.С. Молчанов // Наука и образование. – 2013. – Вып. 10. – С. 259–268.
9. Веселов, Ю. Г. Исследование линейности аэрофотосистем, построенных на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда / Ю.Г. Веселов, С.П. Гулевич, А.С. Молчанов // Наука и образование. – 2013. – Вып. 9. – С. 313–324.
10. Артюшин, Л. Ф. Основы воспроизведения цвета в фотографии и полиграфии / Л.Ф. Артюшин. – М.: Искусство, 1970. – 548 с.
11. Гуревич, М. М. Цвет и его измерение / М.М. Гуревич. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1950. – 270 с.

Применение перспективных направлений пространственно-временной геостатистики в агропромышленном комплексе

Application of perspective directions of space-time geostatistics in the agro-industrial complex

Захарян / Zakharyan Y.

Юрий Гайказович

(dzhem.m@yandex.ru)

кандидат технических наук, профессор.

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский

институт, старший научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: пространственно-временная геостатистика – space-time geostatistics; целесообразность – feasibility; ковариационная функция – covariance function; точное земледелие – accurate farming; вариограммный анализ – variogram analysis.

Пространственно-временной геостатистический анализ дал возможность использовать методологии геостатистики и ковариационную функцию, которые были расположены на нерегулярной пространственной и временной сетке. Предлагается алгоритм двухточечной пространственной вариации, при предположении о стационарности второго порядка для сельскохозяйственных территорий, а также для решения одного из принципиальных вопросов применения перспективных направлений в пространственно-временном континууме о целесообразности дифференциации технологических воздействий и перехода на четырехмерную систему x, y, z, t с учетом геоинформационных данных и анализа космического мониторинга.

Spatial-time geostatistical analysis has made it possible to use geostatistics and covariance functions that were located on an irregular spatial and temporal grid. The algorithm of two-point spatial variation has been suggested, with the assumption of second-order stationarity for agricultural areas, and also for solving one of the principal questions of applying perspective directions in the space-time continuum about the expediency of differentiating technological influences and transition to the four-dimensional system x, y, z, t , taking into account geo-information data and analysis of space monitoring.

Введение

Анализируя явления вариации пространственно-временной геостатистики с этой ведущей областью современной науки трудно или невозможно получить закон распределения данных на основе физических

процессов, обуславливающих эти явления. Обычно физические методы дают хорошую модель общего тренда, который дает направление преимущественного движения показателя пространственно-временного компонента, а трудности локального анализа детализации физического описания ведут к увеличению числа параметров, большая часть которых неизвестна. Детализации физической модели не уменьшают неопределенность, а иногда даже увеличивают её. Альтернативным подходом является геостатистическое описание пространственного и временного распределений, базирующееся на данных климатологических измерений, которые несут в себе информацию о процессе агрометеорологических и внешних параметрах. Оценки геостатистических явлений опираются на информацию о внутренней структуре данных, зависят от самих данных, т. е. являются адаптивными [1, 2, 3]. Геостатистика базируется на статистической интерпретации данных, но по сути это не означает, что природа самого процесса является случайной величиной. Концепция геостатистических анализов (Webster R., Oliver M.) показала, что структура данных зависит как от деформированного пространства-времени, так и от недеформированной поверхности сельскохозяйственной территории, которые в свою очередь, создают пространственно-временную вариабельность. Чтобы определить понятие «деформированного» пространства-времени, напомним сначала хроногеометрическую или метрическую структуру «недеформированного» пространства-времени.

Структура такого «недеформированного» пространства-времени является однородной, т. е. одной и той же повсюду в пространстве-времени. Концепция континуума пространства-времени была предложена Альбертом Эйнштейном. Согласно общераспространенному представлению о Вселенной, три измерения пространства и одно измерение времени рассматрива-

ются как отдельные категории, но согласно концепции пространственно-временного континуума – это четыре равноценных измерения.

Что же такое хроногеометрическая структура «деформированного» пространства-времени (которое обычно называют «искривленным»)? Это структура, в которой «расстояние-время» между двумя событиями по-прежнему дается определенным «квадратом интервала», но в которой, в отличие от случая пространства-времени Минковского, этот квадрат интервала имеет очень сложное математическое выражение для двух далеких событий. Зато, если рассмотреть очень близкие друг к другу события (как в пространстве, так и во времени), квадрат интервала будет определяться достаточно простой математической формулой, хотя и более сложной по сравнению с соответствующей формулой для пространства-времени Минковского. Квадрат интервала между двумя событиями в деформированном пространстве-времени весьма напоминает квадрат расстояния между двумя точками искривленной поверхности, вложенной в обычное евклидово пространство.

В качестве примера искривленной поверхности возьмем поверхность Земли. Если рассмотреть небольшой участок земной поверхности, например сельскохозяйственный участок в один квадратный метр, то, в принципе, его можно отождествить с небольшой частью плоскости (достаточно рассмотреть касательную плоскость к точке, расположенной недалеко от центра рассматриваемого поля). Таким образом, квадрат расстояния (т. е. расстояние, возведенное в квадрат) между двумя точками на этой небольшой поверхности будет в очень хорошем приближении равен квадрату расстояния между двумя точками на плоскости [4]. Един-

ственная сложность заключается в невозможности покрыть всю поверхность территории с ее горами и долинами абсолютно регулярной сеткой координат (таких как длина и ширина).

Чтобы зафиксировать любую точку на искривленной поверхности, мы, таким образом, используем два параметра, скажем x и y , которые больше не имеют простого смысла длины и ширины. Например, на поверхности Земли в качестве «первой координаты» x можно использовать долготу, а в качестве «второй координаты» y – широту. Следует отметить, что такие координаты можно использовать, даже когда земную поверхность невозможно аппроксимировать сферой: например, на возвышенности или в низине. При этом нет необходимости вводить третью координату (скажем, высоту над уровнем моря), поскольку двух первых координат (долготы и широты) будет достаточно, чтобы определить положение на территории, а высота будет определяться некоторой функцией долготы и широты. Отсюда легко видеть, что если использовать сетку, определяемую долготой и широтой, на небольшой части поверхности изучаемой территории на неоднородной местности, то эта сетка будет представлять собой деформацию, как привычная сетка из школьной тетради в клетку, поверхность по-прежнему будет разбиваться на ячейки двумя семействами линий, но каждая ячейка будет не квадратом, а чем-то вроде параллелограмма, точнее, ее стороны просто не будут равны друг другу и перестанут пересекаться под прямым углом.

Чтобы определить квадрат расстояния между близкими точками вообще любой искривленной поверхности, точки которой фиксируются двумя координатами x и y , необходимо, таким образом, задать в каждой точке три величины: коэффициент перед квадратом

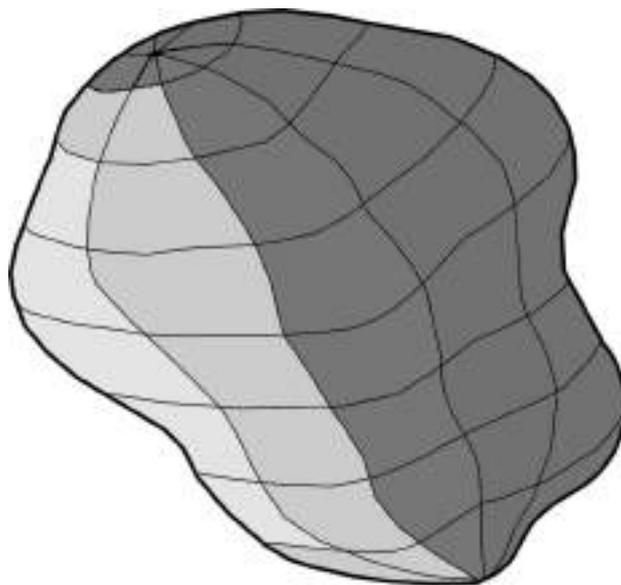


Рис. 1. Сетка, определенная на искривленной поверхности двумя координатами x и y

dx^2 разности dx между первыми координатами двух точек, коэффициент перед квадратом dy^2 разности dy между вторыми координатами и коэффициент перед удвоенным произведением $2dxdy$. (Мы рассматриваем математический предел, в котором точки бесконечно близки, отсюда символ d , обозначающий бесконечно малую разность). Эти три коэффициента определяют геометрию (geometry) рассматриваемой поверхности сельскохозяйственной территории и по этой причине обозначаются соответственно как g_{xx} , g_{yy} и g_{xy} , где буква g напоминает нам, что речь идет о геометрии.

В свое время пространство-временного термина Альберт Эйнштейн вспомнил, что геометрия «деформированной» (или неплоской) поверхности определяется с помощью трех величин g_{xx} , g_{yy} и g_{xy} , заданных в каждой точке поверхности (Ал. Эйнштейн, 1912). Этот набор данных, определяющий для каждой точки поверхности территории значения трех величин g_{xx} , g_{yy} и g_{xy} , называется «геометрическим тензором», а точнее, «метрическим тензором» g . Эйнштейн понял, что ему требуется обобщение этого понятия на случай, когда (двумерная) поверхность заменяется на (четырёхмерное) пространство-время. Математик Бернхард Риман, студент Гаусса, уже обобщил теорию Гаусса для деформированных пространств произвольных размерностей. Однако Риман рассматривал исключительно случай пространств, которые локально, т. е. в окрестности каждой точки, напоминают обычное евклидово пространство. Другими словами, он изучал пространства, в которых геометрическое место точек, разделенных с данной центральной точкой малым значением квадрата расстояния ε^2 .

Мы будем рассматривать регионализированные данные, т. е. измерения, обладающие привязкой координаты:

- пространственной, которая определяет географическое положение измерения в пространстве или его относительное измерение по отношению к другим объектам, для определенной местности выбирают специальную координатную систему;
- временной, определяющей время проведения измерения, абсолютное или относительное;
- пространственно-временной, одновременно пространственной и временной.

Необходимое требование к системе координат – это ее метричность, дающая возможность вычислять расстояния между точками, x_1 и $x_2 \Rightarrow x_1 = (x_1, y_1)$; $x_2 = (x_2, y_2)$, которая определяется в евклидовом порядке:

$$\|(x_1, y_1)(x_2, y_2)\| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (1)$$

В n -мерном пространстве евклидово расстояние между двумя точками вычисляется следующим образом:

$$\|(\bar{x}_1)(\bar{x}_2)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2}. \quad (2)$$

Что касается пространственно-временного континуума, $(D \times T)$ будут рассматриваться в теории пространственно-временной геостатистики [5, 6].

Различие масштабов связано с измерениями: например, если рассматривать распространение загрязнения в почве, то горизонтальные пространственные области распространяются на десятки километров (10^4 – 10^5 м), в то время как рассматриваемая глубина при анализе почвы не превышает 0,3 м, а геологические слои могут иметь толщину от нескольких сантиметров до сотен метров. При работе с такими различными масштабами обычно производится нормировка координат – переход к другой системе, где размерности соизмеримы, например линейное преобразование на отрезок $(0, 1)$.

Поскольку пространство-время является четырехмерным, необходимо иметь четыре координаты, чтобы точно определить какие-либо почвенно-климатические и агрофизические события. Можно обозначить эти координаты различными способами, из которых наиболее распространены: (x, y, z, t) (x_1, x_2, x_3, x_4) или (x_0, x_1, x_2, x_3) .

В выборе этих четырех координат имеется полная математическая свобода или, другими словами, что никакой конкретный способ фиксации точек пространства-времени не является заведомо предпочтительным.

Пространственную переменную V можно рассматривать как функцию точки пространства x : $Z = Z(x)$. Однако чаще интерес представляют не точечные, а средние значения величины $Z(x)$ в пределах малой области пространства – геометрической базы (support).

Пространственно-временные данные являются реализацией случайного поля $Z(x, t)\{Z(x, t); x \in D, t \in T\}$, где D – пространственная область; T – временной интервал. Часто эти параметры могут быть представлены в виде пространственно распределенных временных рядов, они могут быть распределены неравномерно и в пространственно-временном континууме $D \times T$. Чтобы использовать геостатистические методы для оценки влияния агрометеорологических параметров на фактор продуктивности, а также на эффективность планируемых технологических воздействий, [7, 8] необходимо определить пространственно-временную корреляционную структуру поля $Z(x, t)$ в области исследования пространственно-временного континуума.

Чтобы описать значение пространственно-временной корреляции, используются моменты стационарности первого и второго порядков. Приведем основные из них (ковариацию и вариограмму). Ковариация и вариограмма считаются основными параметрами в континууме $D \times T$.

Ковариация агрометеорологического фактора, которая зависит в случае стационарности второго порядка только от пространственного и временного лагов h и τ , имеет вид:

$$C_z(h, \tau) = E\{[Z(x+h, t+\tau) - m(x+h, t+\tau)][Z(x, t) - m(x, t)]\}, \quad (3)$$

где $Z(x, t)$ – случайное поле в пространственно-временной точке (x, t) , $m(x, t)$ – среднее значение случайного поля,

при $m = E\{Z(x,t)\} = const$ по времени и по пространству, формула (3) после преобразования легко показать, что при ковариации пространственно-временных функций получим:

$$C_z(h,\tau) = E[Z(x,t)Z(x+h,t+\tau) - m]^2 \quad (4)$$

при $C_z(0,0) = \sigma_z^2$ по определению, C_z – пространственно-временная ковариационная функция, должна обладать такой же характеристикой, что и чисто пространственная, т. е. при $|h| \rightarrow 0, |\tau| \rightarrow 0 \Rightarrow C_z(0,0)$. Для пространственной и временной составляющих:

$$\lim_{|h| \rightarrow \infty} C_z(h,\tau) = \lim_{|\tau| \rightarrow \infty} C_z(h,\tau) = \lim_{|h|, |\tau| \rightarrow \infty} C_z(h,\tau) = 0. \quad (5)$$

Для экспериментальных точек $N(h,\tau)$ пространственный вектор h и временной лаг τ , при предположении, что среднее постоянно, то пространственно-временная ковариационная функция получит вид:

$$\bar{C}_z(h,\tau) = \frac{1}{N(h,\tau)} \sum [(Z(x+h,t+\tau) - \bar{m})(Z(x,t) - \bar{m})], \quad (6)$$

где \bar{m} – классическая оценка среднего по N пространственно-временной функции $Z(x,t)$:

$$m = \frac{1}{N(h,\tau)} \sum_{i=1}^N Z(x,t).$$

Пространственно-временная ковариационная функция может быть вычислена для данных, которые расположены на нерегулярной пространственной и временной сетке. В таких случаях нет необходимости иметь измерения в одной и той же точке в различные моменты времени. При оценке ковариационной функции, формула (6) может оказаться смещенной вследствие того факта, что мы используем оценку неизвестного нам среднего m вместо неизвестного варьирующего агрометеорологического параметра.

Вариограмма для пространственного случая [9–11] дает возможность избежать геостатистической оценки среднего, перейдя к приращениям:

$$\gamma_z(h,\tau) = \frac{1}{2} Var[Z(x+h,t+\tau) - Z(x,t)]. \quad (7)$$

Учитывая двухточечную вариацию, при предположении о стационарности второго порядка для $Z(x+h,t+\tau) - Z(x,t)$ поля Z , вариограмма пространственно-временных параметров (7) после преобразования, при условии $E[Z(x+h,t+\tau) - Z(x,t)] = 0$, примет вид:

$$\gamma_z(h,\tau) = \frac{1}{2} E[\{Z(x+h,t+\tau) - Z(x,t)\}^2]. \quad (8)$$

Качество или характер пространственно-временной вариограммы не отличаются от свойств вариограммы пространственной variability почвенно-климатических параметров.

Для оценки математического ожидания:

$$\bar{\gamma}_z(h,\tau) = \frac{1}{2N(h,t)} \sum [\{Z(x+h,t+\tau) - Z(x,t)\}^2]. \quad (9)$$

Пространственно-временную вариограмму ковариационной функции можно оценить, даже если данные расположены на нерегулярной пространственно-временной области ($D \times T$).

При малых \bar{h} значения нормированной вариограммы $v(\bar{h}) = \frac{\gamma(\bar{h})}{D}$ стремятся к отношению

$$\mathfrak{S} = \frac{D_{\mathfrak{S}}}{D} = \frac{D_{\mathfrak{S}}}{D_S + D_{\mathfrak{S}}}, \quad (10)$$

где $D = D_S + D_{\mathfrak{S}}$ является дисперсией случайной микрокомпоненты \mathfrak{D}_S и $D_{\mathfrak{S}}$, – показывает, какова доля дисперсии случайной микрокомпоненты, т. е. доля наггета, в суммарной дисперсии пространственной variability поля. В дальнейшем будет показано, что показатель \mathfrak{S} важен с точки зрения оценки перспективности современного направления развития пространственно-временной геостатистики в агропромышленном комплексе, особенно при планировании технологий точного земледелия. Приведенные выше формулы показывают, что в случае выполнения гипотезы стационарности второго порядка вариограммная и ковариационная функции оказываются эквивалентными инструментами геостатистического анализа, однако существуют природные явления, для которых условия стационарности в указанном смысле не выполняется.

Таким образом, осуществляемый в геостатистике переход от анализа ковариации к анализу вариограмм, является не простой формальной процедурой замены одной функции другой, а имеет принципиальное значение, существенно расширяя область геостатистических исследований и повышая их теоретическую обоснованность [12, 13, 14].

Принимая во внимание фундаментальные свойства вариограммной функции, можно сделать расчет и аналитическую аппроксимацию для эмпирических вариограмм (т. е. отличие эмпирической оценки от соответствующей теоретической величины). Рассмотрим кратко аппроксимационные модели, представляющие интерес с точки зрения их использования для структуры пространственно варьирующих факторов сельскохозяйственных территорий (рис. 2).

Модели пространственно-временных ковариационных функций и вариограмм, способствующие объединению пространственных и временных координат, были предложены различными теоретическими аспектами. Основной проблемой при моделировании простран-

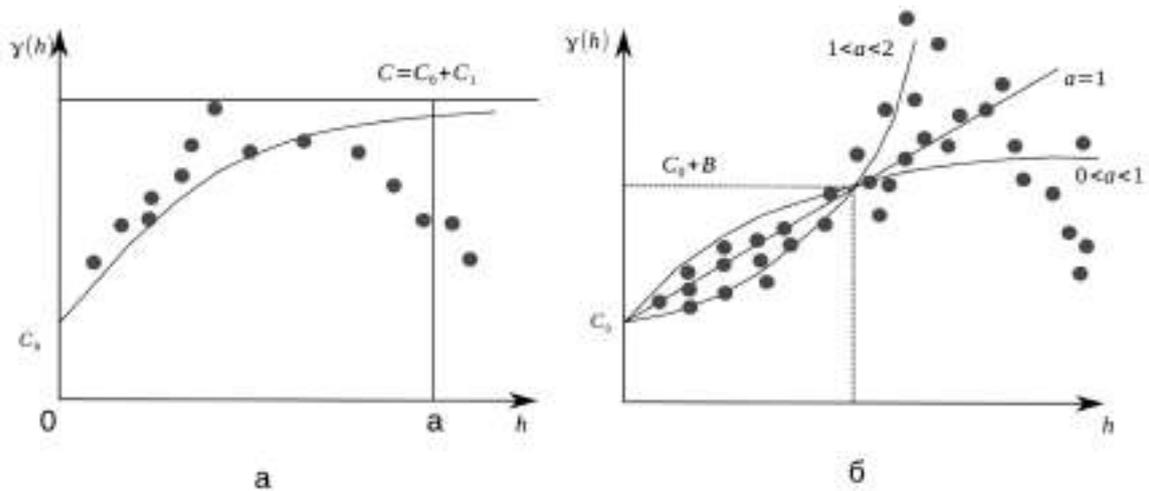


Рис. 2. Модели вариограммной функции: а – экспоненциальная, б – степенная

ственно-временной корреляции является необходимость определения метрики на пространственно-временном континууме. Такие подробные сжатые сообщения о геостатистических моделях были даны Kyriakidis и Journel в 1999 году. Учитывая иллюстрации вышеуказанных авторов по этому вопросу модели пространственно-временной корреляционной структуры можно разделить на две части: предусматривающие (разделение на пространственную и временную) и не предусматривающие.

Экспоненциальная модель (рис. 2а):

$$\gamma_z(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } h = 0, \\ C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right] & \text{при } h > 0, \end{cases} \quad (11)$$

где c_0 и c_1 в этой формуле имеют приближенные значения (эмпирические оценки) уже знакомых нам дисперсий D_{Σ} и D_S , соответствующих микро и мезомасштабной изменчивости рассматриваемого фактора F ; a – расстояние между точками или часто в геостатистике называют лагом или рангом вариограммы. Необходимо иметь в виду [9], что возрастание вариограммной функции одновременно всегда означает ослабление пространственно-временной корреляции, а также можно утверждать, что экспоненциальная модель описывает такую ситуацию, когда статистическая связь значений варьирующего фактора в отдельных точках с увеличением расстояния между этими точками ослабевает гораздо быстрее.

Степенная модель (рис. 2б):

$$\gamma_z(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } h = 0, \\ C_0 + Bh^a & \text{при } h > 0, \end{cases} \quad (12)$$

где B имеет размерность квадрата варьирующего фактора, a устанавливается в пределах $0 < a < 2$. Функция

$\gamma_z(h)$ постоянно растет с увеличением расстояния h , которое характерно для вариограмм нестационарных полей. Степенная модель (12) безусловно не может быть использована для адекватного описания вариограммных функций стационарных полей в широком диапазоне изменения h , а также представляют интерес значения показателя степени a , с высокой точностью описывающие характер стационарной вариограммы на малых и средних расстояниях. В отличие от экспоненциальной модели, при $a=1$ мы получаем линейную вариограмму, в диапазоне $0 < a < 1$ получается выпуклая кривая, которая при малых h растет быстрее, чем в случае линейной зависимости, а в интервале $1 < a < 2$ получается вогнутой, анализируя, приходим к выводу, что на малых расстояниях вариограмма возрастает медленнее, чем в линейной иллюстрации.

В агропромышленном комплексе практической реализации концепции оптимального планирования агротехнологических решений в системе точного земледелия представляет особый интерес пространственно-временной геостатистический анализ, который в отечественных журналах представлен мало, исключая [1, 8, 10, 15]. Геостатистическое исследование в случаях планирования дифференцированных агротехнологий с учетом вариабельности почвенно климатических факторов является расчетом вариограммных функций и кригингов всех классификаций. Можно отметить, что перед расчетом каждой вариограммы из соответствующих исходных данных вычленилась трендовая компонента при аппроксимации стационарности второго порядка, и полученные вариограммные функции иллюстрируют пространственно-временную вариабельность не самих варьирующих показателей, а их отклонений от трендов [10]. На рис. 3а,б приведены нормированные вариограммы $v = v(h)$. Для двух почвенных характеристик (гумуса и РН (Сидорова В. А.)).

На полученных результатах легко видеть, что вариограммы полей гумуса и РН весьма похожи, из

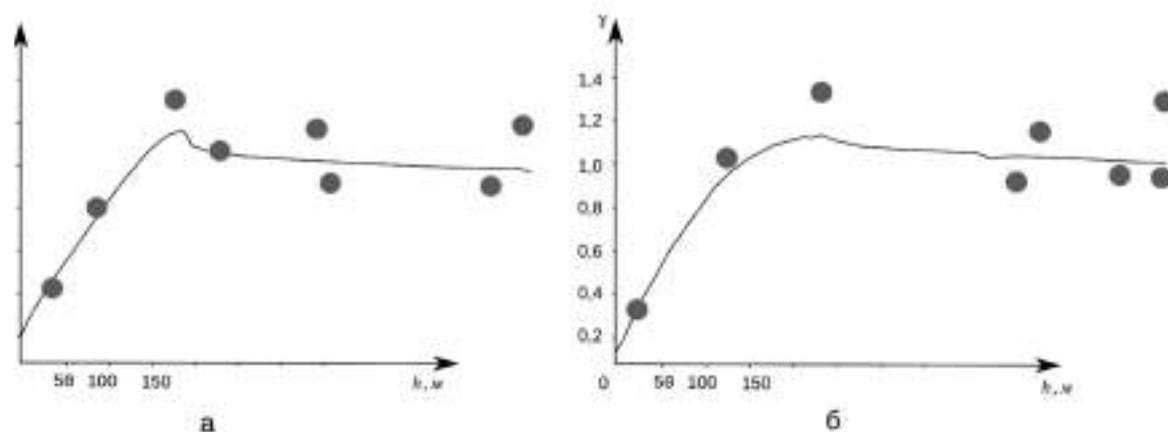


Рис. 3. Нормированные вариограммы почвенных показателей МОС АФИ

графика видно, что интервал затухания пространственных корреляционных связей составляет ≈ 100 м, нагетт-дисперсия оказывается мала и ее доля в общей дисперсии пространственного варьирования как гумуса, так и РН, не превосходит 8% ($\mathcal{Z} = 0,08$), а также можно говорить о калии и о фосфоре, что составляет 9 и 12% соответственно.

Можно отметить, что в данном случае распределения калия и фосфора характеризуются большей пространственной изменчивостью, чем распределения гумуса и РН при стратегии дифференциации агротехнологических воздействий. Современные направления системы оптимального планирования агротехнологии обычно предусматривают дифференциацию стратегии технологических приемов от поля к полю или от региона к региону, и при таких случаях пространственно-временная изменчивость, которая является фактором формирования урожая, учитывается в пределах большой сельскохозяйственной территории, с учетом того, что микромасштабная компонента пространственно-временной неоднородности, т. е. нагетт-дисперсия вариабельности, была незначительна.

Таким образом, в рамках рассматриваемого подхода на сегодняшний день существуют определенные прикладные геостатистические пакеты, которые позволяют обрабатывать экспериментальные данные по пространственным и временным характеристикам, а также выделять тренды и подбирать соответствующие аппроксимационные зависимости, проводить пространственное осреднение, автоматизированное картирование, одним словом, обеспечивают широкого профиля комплекс задач методом геостатистического научного исследования путем рассмотрения вариограммных функций. Необходимо учесть, что программное обеспечение ориентировано на использование квалифицированными специалистами [10] и недоступно работникам сельскохозяйственной сферы.

Есть некоторые программы, которые наиболее популярны и доступны, которые в совокупности отражают весь спектр геостатистических моделей. Альтернативным пакетом может служить Variowin – интерактивная программа под Windows для анализа и моделирования пространственной корреляционной структуры данных, включая построение модели вариограммы. GeoEAS – один из старейших программных пакетов по геостатистике, содержащий набор программ для выполнения геостатистической интерполяции (кригинга).

Существуют коммерческие геостатистические программные продукты наиболее распространенных пакетов для пространственной интерполяции SURFER Golden Software, включены простой и обычный кригинг. Более обширный список компьютерных программ по геостатистике можно найти на основном сервере (<http://www.ai-geostats.org>).

Применяя современные направления пространственно-временного кригинга и анализа для моделирования, использовалась информация почвенно-климатических данных, которые с необходимой детальностью иллюстрируют пространственное варьирование интересующего нас почвенного показателя при планировании дифференциации агротехнологических приемов, также стратегии формирования фактора продуктивности. Главным элементом такого анализа является выделение из исходных данных трендовой составляющей макрокомпонентов сельскохозяйственных территорий, которые мало изучены в отечественном агропромышленном комплексе.

Нормированная вариограмма, вариограммный анализ как инструмент исследования пространственно-временной вариабельности сельскохозяйственных территорий, которые базируются на кригинге – особой вычислительной процедуре, обеспечивающей оптимальное (в смысле минимума нагетт-дисперсии) восстановление непрерывного поля пространственной переменной или получение оптимальных оценок средних

значений варьирующего фактора, актуальны для развития направления целесообразности дифференциации агротехнологии до трех–четырёх градаций.

Заключение

Рассмотренные геостатистические модели и предложенная методика позволяют установить четкие количественные соотношения для применения перспективных направлений пространственно – временной геостатистики в агропромышленном комплексе и, исходя из этого, оценить целесообразность перехода агротехнологических воздействий ориентировано на среднее условия варьирующих агрометеорологических факторов к внутривидовой технологии с учетом пространственно-временной геостатистики.

Оценка такого анализа и переход к другой системе (пространство – временная, которая является четырехмерными) x, y, z, t дают возможность для точного определения каких-либо почвенно-климатических и агрофизических событий рассматриваемом пространственно-временном континууме (DxT) в теории пространственно-временной геостатистики. Вопрос о перспективности перехода от стандартных агротехнологий, предусматривающих дифференциацию агротехнических воздействий от поля к полю к точному земледелию, когда технологический процесс дифференцируется по изменчивым условиям внутри отдельных сельскохозяйственных территориях, необходимо предварительно выяснить: в какой мере вариабельность условий, наблюдаемая в пределах некоторых достаточно большой территории, определяется вариабельностью этих условий в пределах единичного поля. Важно установить, какую долю от наблюдаемой в пределах поля общей изменчивости составляет микромасштабная компонента, которая должна быть не слишком значительной.

Литература

1. Захарян, Ю. Г. Геостатистический анализ неоднородностей агрометеорологических факторов продуктивности полей в системе точного земледелия / Ю.Г. Захарян // Информация и Космос. – 2014. – № 4. – С. 55–58.
2. Красильников, П. В. Геостатистика и география почв / П.В. Красильников. – М.: Наука, 2007. – 177 с.
3. Геостатистическая оценка рискованности земледелия РФ по комплексу метеорологических факторов / И.Б. Усков [и др.] // Материалы I Всероссийской открытой конференции «Почвенные и земельные ресурсы: Состояние, оценка, использование». – М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2014. – С. 157–160.
4. Демяков, В. В. Геостатистика: Теория и практика / В.В. Демяков, Е.А. Савельева ; под ред. Р.В. Арутюняна. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
5. Isaaks, E.H. Applied Geostatistics / E.H. Isaaks, R. Srivastava // Oxford University press. – 1989. – P. 35–39.

6. Uskov, A. Expedient spatial differentiation of technologies of precise agriculture according to productivity factors / A. Uskov, Y. Zakharian // JIAC200-book of abstracts, 2009. – 113 p.

7. Якушев, В. П. Вариограммный анализ для обоснования технологии точного земледелия / В.П. Якушев, Е.Е. Жуковский, В.В. Якушев // Вестник РАСХН. – 2009. – № 3. – С. 16–20.

8. Якушев, В. П. Информационное обеспечение точного земледелия / В.П. Якушев, В.В. Якушев. – СПб, 2007. – 382 с.

9. Вариограммный анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия (методические пособие) / В.П. Якушев [и др.]. – СПб, 2010. – 47 с.

10. Journal, A. G. Mining Geostistics / A. Journal, Ch.J. Huijbregts // Acad. Press. – UK, London, 1978. – 600 p.

11. McBrathey, A.B. Future Directions of Precision Agriculture / A.B. McBrathey, B.A. Whelan // Precision Agriculture. – 2005. – Vol. 6. – P. 17–23.

12. Webster, R. Geostatistics for Environmental Scientists / R. Webster, M.A. Oliver. – Chichester: John Willey and Sons, 2007. – 330 p.

13. Keery, R. Variograms of Ancillary Data to Aid Sampling for Soil Surveys / R. Keery, M.A. Oliver // Precision Agriculture. – 2003. – Vol. 4. – P. 24–38.

14. Tozer, P. R. Is it Economically Feasible to Harvest Management Zone? / P.R. Tozer, J.I. Bindi // Precision Agriculture. – 2007. – Vol. 8. – P. 54–57.

15. Колмогоров, А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей / А.Н. Колмогоров. – М.: Изв.АН СССР, 1941. – С. 3–14.

16. Якушев, В. П. Информационное обеспечение точного земледелия / В.П. Якушев, В.В. Якушев. – СПб.: ПИЯФ РАН, 2007. – 384 с.

Метод распределенных вычислений для решения класса геоинформационных задач, чувствительных к масштабу и размерности векторов исходных данных

Method of distributed computing for solving a class of geoinformation problems that are sensitive to the scale and dimension of the input data vectors

Титов / Titov G.

Григорий Сергеевич

(nav73@yandex.ru)

ПАО «Интелтех»,

начальник отдела,

ведущий разработчик ГИС-систем.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: метод распределенных вычислений – method of distributed computing; система поддержки принятия решений – decision support system; геопроостранственные данные большой размерности – geospatial data of large dimension; вычисление оптимального маршрута – calculation of the optimal route; метод динамического программирования Беллмана – Bellman's method of dynamic programming.

Предложен метод организации вычислений при обработке геопроостранственных данных большой размерности в системах поддержки принятия решений. В отличие от известных методов, требующих либо построения фронта волны, либо применения эвристических правил, предлагаемый метод обеспечивает решение путем декомпозиции задачи на более простые, построения частных решений и объединения частных решений в общее.

A method for organizing computations for processing large-scale geospatial data in decision support systems has been proposed. Unlike well-known methods that require either the construction of a wavefront or the application of heuristic rules, the proposed method provides a solution by decomposing the problem into simpler ones, constructing particular solutions and combining particular solutions into a general one.

Введение

Создаваемые в настоящее время системы поддержки принятия решений (СППР) базируются на широком использовании геоинформационных технологий с использованием различных комбинаций информационных и аналитических алгоритмов.

Решение задач СППР с применением современных геоинформационных технологий должно способствовать повышению эффективности и оперативности принимаемых решений, сокращению времени, необ-

ходимого для планирования и организации действий должностных лиц (ДЛ), однако на практике существующие алгоритмы таких расчётов в ГИС имеют сильную временную зависимость как от масштаба электронной карты местности, так и от охватываемой зоны ответственности, сложности рельефа и других многочисленных параметров картографической информации, что в свою очередь делает невозможным осуществление поддержки деятельности ДЛ в реальном масштабе времени.

В данной статье описывается разработанный автором метод решения подкласса геоинформационных задач, использующих растровую модель местности, который характеризуется:

- сравнительно малым требуемым объемом ОЗУ, не зависящим от размера рабочей области;
- низкой чувствительностью к структуре исходных данных (сложность рельефа, наличие неоднородностей в рельефе).

В качестве приложения метода в данной статье описывается решение задачи определения оптимального маршрута мобильного объекта на пересеченной местности [1].

В таблице 1 представлены значения величины требований к вычислительным ресурсам на примере волнового алгоритма, описанного в [1]. Размер клетки определяется из расчета 0.5 мм карты. Из таблицы видно, что реализация алгоритма в условиях горного рельефа невозможна на настольных ПК, в которых объем ОЗУ ограничивается 24 Гб.

Для представленного в статье распределенного метода требования к ресурсам приемлемы для современных вычислительных платформ, в т.ч. для настольных ПК. Метод нечувствителен к наличию неоднородностей в исходных данных. Результаты оценки представлены в разделе "Анализ требуемых ресурсов", где приводятся соотношения, определяющие необходимые ресурсы и результаты измерения времени исполнения в процессе

Зависимость объема ОЗУ от шага сетки для участка 500км*100км

Масштаб карты	Размер клетки, м	Требуемый объем ОЗУ (Гб)	Примечания
1:200000	100	0.4	Расчеты с данным размером клетки производились для равнинных участков местности
1:100000	50	1.4	
1:50000	25	5.8	Минимальная точность, необходимая для горных участков местности
1:25000	12.5	23	

решения практически значимых задач рассматриваемого класса.

Описание задачи

Рассматриваемый метод обеспечивает решение группы задач, исходными данными для которых является растровая модель местности [1].

Пусть задана матрица $Z(x,y)$, где каждый элемент определяет максимальные затраты на преодоление участка местности с координатами (y,x) . Участок местности, соответствующий элементу матрицы, считается квадратом со стороной d , правильно ориентированным вдоль координатных осей. Под координатами участка понимаются матричные индексы: y – номер строки матрицы, x – номер столбца.

При переходе с данного участка на смежный участок считается, что переход осуществляется из центра одного участка в центр другого. Затраты на переход равны среднему значению затрат по двум смежным участкам:

$$z_{12} = (z_1 + z_2)/2 \quad (1)$$

В качестве затрат на практике может использоваться расход топлива, время движения. Обозначим матрицу затрат попарных переходов $\tilde{Z}=\{z_{ij}\}$. Пусть $Z \in R^{N \times M}$, тогда $\tilde{Z} \in R^{(N * M) \times 8}$.

Затраты на маршруте определяются суммой затрат по всем переходам между точками маршрута:

$$Q = \sum_{i=1}^{N-1} z_{i,i+1} \quad (2)$$

где N – число точек маршрута. При построении оптимального маршрута на каждом шаге необходимо выбирать направление дальнейшего движения. Результат выбора называется шаговым управлением и обозначается c_k . Управление всей операцией состоит из совокупности шаговых управлений $C = (c_1, c_2, \dots, c_{m-1})$.

Требуется построить матрицу шаговых управлений $S(y,x)$, при которой достигается минимум матрицы накопленных затрат Q .

Для решения данной задачи традиционно применяются методы информированного поиска типа A^* [4], волновой метод [1].

Недостаток методов информированного поиска типа A^* заключается в необходимости подбора эвристики, что требует наличия априорной глобальной информации об участке местности. Во-вторых, требуется одновременное хранение всей исходной информации об участке местности, что, как показано в таблице 1, при сравнительно большом участке местности предъявляет недопустимо высокие ресурсы к объему ОЗУ.

Аналогично недостатком централизованного итерационного алгоритма, описанного в [1], является необходимость хранения полной сетки растровой модели в ОЗУ одного вычислителя, а также необходимость рассчитывать фронт волны. Расчет фронта волны требует значительных вычислительных ресурсов при наличии неоднородностей в исходных данных, например наличие непреодолимых для движения областей порождает ситуации с многочисленными отражениями и наложениями волн, которые сложно учитывать в расчетах.

В данной статье рассматривается метод, основанный на декомпозиции исходной задачи на более

простые, их решении с использованием распределенной процедуры вычислений, построении общего решения из частных решений.

Для решения задачи могут быть использованы следующие виды декомпозиции:

1. на основе геометрического разбиения;
2. на основе разбиения графа.

Способ №1 основывается на построении покрытия рабочей области однотипными геометрическими фигурами, например, квадратами, правильными треугольниками, правильными шестиугольниками (“паркет из правильных многоугольников”).

Способ №2 опирается на различные разложения графа задачи $G = (V, E)$, определяемого матрицей попарных переходов Z , на подграфы. Метод разложения определяется предъявляемым к подграфам требованиям. Если требованием является наличие маршрута между каждой парой принадлежащих подграфу вершин, то задача решается методом разбиения графа на сильно-связанные компоненты [3]. Если требуется обеспечить “близость” вершин подграфа в смысле некоторой метрики, то решение задачи может быть получено с помощью методов кластеризации. Для задачи нахождения разбиения

с минимальным суммарным “весом” ребер, связывающих разбиение, может быть использован алгоритм определения максимального потока в графе – Форда-Фалкерсона [3].

В связи с отсутствием априорных данных о характере местности, для которой выполняется декомпозиция матрицы переходов, обоснованный выбор универсального критерия и соответствующего метода разбиения, обеспечивающего необходимые свойства подграфов в варианте №1, не представляется возможным. В то же время, определение параметров геометрического разбиения может быть выполнено на основе стандартизованного растрового представления географических данных.

В связи с этим для решения задачи используется декомпозиция на основе геометрического разбиения. В качестве элемента разбиения будем использовать единицу стандартной растровой модели – квадрат. Размер квадрата является параметром декомпозиции, определяемым свойствами местности. Разбиение графа может быть использовано на этапе предварительной обработки, например для выделения изолированных участков местности, что позволит в некоторых случаях сократить площадь рабочей области.

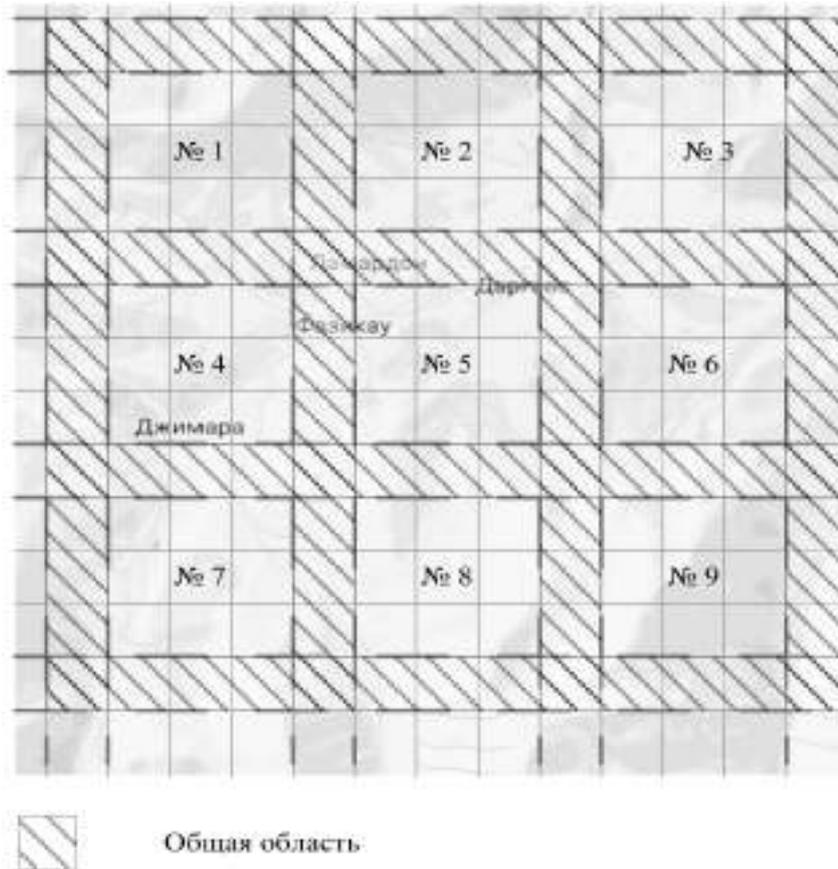


Рис. 1. Разбиение области поиска на блоки

Описание метода

Метод базируется на принципе декомпозиции задачи на более мелкие, слабосвязанные подзадачи, решение которых основано на простых алгоритмах. Для каждой задачи назначается собственный набор исходных данных, полученный путем разбиения матрицы Z на подмножества $\{Z_i\}_{i \in I:N}$.

Метод обеспечивает решение поставленной задачи в три этапа:

1. Построение разбиения $\{Z_i\}_{i \in I:N}$ матрицы Z .
2. Независимое решение подзадач на множестве разбиений с построением частных решений.
3. Построение общего решения на основе множества частных решений.

Этап 1. Построение разбиения $\{Z_i\}_{i \in I:N}$ матрицы Z .

Область расчетов представляется в виде блоков с равным количеством столбцов и строк, имеющих общие границы, например на рис. 1 показано разбиение на блоки со стороной, равной 5 ячеек.

Пусть сетка включает N строк и M столбцов, G – общее количество блоков, B – размер блока в клетках исходной сетки, $B > 1$, GH – количество блоков по горизонтали, GV – количество блоков по вертикали, оператор $[]$ извлекает целую часть выражения. Тогда будут справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} G &= \left\lfloor \frac{(M-1)*(N-1)}{(B-1)*(B-1)} \right\rfloor \\ G_H &= \left\lfloor \frac{M-1}{B-1} \right\rfloor \\ G_V &= \left\lfloor \frac{N-1}{B-1} \right\rfloor \end{aligned} \quad (3)$$

По построению, у каждого блока есть 4 соседа. Каждая пара соседних блоков имеет B общих ячеек. Пронумеруем блоки индексами h, v по горизонтали и вертикали соответственно: $h \in 1 : G_H, v \in 1 : G_V$.

В результате декомпозиции получаем вместо исходной сетки размером $M*N$ множество блоков $\{B_i\}_{i=1}^G$ размером $B*B$.

Переходы между каждой парой ячеек сетки (8 несимметричных переходов по построению) имеют свой весовой коэффициент (C_1, C_2, \dots, C_8).

Каждому блоку B_i соответствует матрица попарных переходов $\tilde{Z}_i = \{z_{ij}\}$, z_{ij} – затраты на переход между соседними ячейками i, j . На основе матрицы Z_i для каждого блока может быть задан граф, вершинами которого являются ячейки сетки, дугами – переходы между ними. Вес каждой дуги – затраты на переход между ячейками. По построению, у каждой вершины может быть не более 8 дуг, т.е. можно считать матрицу графа разреженной.

Для каждого блока B_i вычисляем матрицу кратчайших расстояний из его граничных ячеек во все внутренние ячейки – матрица D_i . С учетом свойства

разреженности матрицы графа для решения задачи вычисления кратчайших расстояний по матрице попарных переходов наиболее подходящим представляется алгоритм Джонсона [3] построения кратчайших маршрутов между всеми парами узлов графа.

Матрица D_i имеет вид:

$$D = \begin{bmatrix} D^N \\ D^S \\ D^E \\ D^W \end{bmatrix} \quad (4)$$

где индексы N, S, E, W соответствуют северной, южной, восточной и западной границам, например, D^N – матрица кратчайших расстояний от граничных ячеек северной границы до всех ячеек блока.

$$D^N = \begin{bmatrix} d_{11}^N & \dots & d_{1R}^N \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{4*B-2,1}^N & \dots & d_{4*B-2,R}^N \end{bmatrix} \quad (5)$$

где R – количество всех ячеек блока $R = B^2$, $4*B-2$ – количество граничных ячеек блока. Аналогичный вид имеют матрицы D^S, D^E, D^W .

Выполним оценку размерности используемых данных на примере. Пусть матрица затрат составлена для участка местности $100 \text{ км} * 500 \text{ км}$, $d=50 \text{ м}$, размер блока $B=30$ элементов. Тогда матрица Z имеет размерность $R^{2000 \times 10000}$, матрица $\tilde{Z}_i \in R^{2*10^7 \times 8}$.

В связи с высокой размерностью исходных данных, разбиваем этап 1 на два подэтапа:

1. Этап предварительных расчетов.
2. Этап непосредственного решения задачи.

На этапе предварительных расчетов выполняется разбиение матрицы Z на блоки B_i , расчет матриц D_i , сохранение данных в базу данных. В рассмотренном примере при разбиении на блоки с $B=30$ получается 23766 блоков с матрицами $Z_i \in R^{30 \times 30}$, $D_i \in R^{118 \times 900}$.

На этапе непосредственного решения задачи определяется подмножество B_{search} блоков, необходимых для решения задачи. В общем случае – это вся рабочая область. На практике пространство поиска можно сократить с использованием эвристических правил. В качестве эвристики при расчете оптимального маршрута между двумя точками может быть использован геометрический буфер с заданным радиусом от отрезка, соединяющего начальную и конечную точку. Радиус буфера определяется свойствами местности.

Для рассмотренного примера при расчете маршрута для начальной и конечной точек, удаленных на расстояние 20 км при радиусе буфера 1.5 км, требуется 108 блоков.

Этап 2. Независимое решение подзадач на множестве разбиений

Метод предполагает использование независимых вычислителей – рабочих процессов, обменивающихся

сообщениями с ограниченным количеством других рабочих процессов и общим управляющим процессом [2].

Связываем с каждым блоком B_i рабочий процесс, который может обмениваться данными только с рабочими процессами, ответственным за соседние блоки, а также с общим управляющим процессом, отслеживающим ход вычислений. Направления обмена данными между рабочими процессами соответствуют отношениям соседства – рис. 2. На рис. 2 используются обозначения: B^* – текущий блок, $B(N)$, $B(S)$, $B(W)$, $B(E)$ его соседние блоки: северный, южный, западный, восточный соответственно.

Алгоритм рабочего процесса представляет собой адаптированный для условий задачи метод пульсации [2].

Аналогично, в соответствии с методом пульсации, строится алгоритм управляющего процесса.

Ход вычислений проиллюстрирован на рисунке 3.

Шаги жизненного цикла РП №№ 1, 2, 4, 5 являются стандартными, требует уточнения только описание “состояния” рабочего процесса. Характеристикой состояния является вектор значений накопленных затрат в граничных ячейках блока

$$p = [p^N, p^S, p^E, p^W]$$

где $p^N, p^S \in R^{1:B}$, $p^E, p^W \in R^{1:(B-1)}$ – векторы накопленных затрат в граничных ячейках с северным, южным, восточным и западным соседом соответственно. Отличие в размерности северного, южного и восточного, западного векторов обусловлено правилом определения принадлежности угловых граничных точек.

На очередной итерации каждый рабочий процесс определяет свои накопленные затраты в граничных ячейках и передает их соседям. По построению граничные ячейки текущего блока и его соседних блоков совпадают по общей границе, следовательно, допустимо простое сравнение накопленных затрат.

Применительно к задаче построения оптимального маршрута, в конце первой итерации значения накопленных затрат определены только для блока, включающего стартовую ячейку. На последующих итерациях алгоритма пульсации за счет этапа 3 вычисляются состояния остальных блоков.

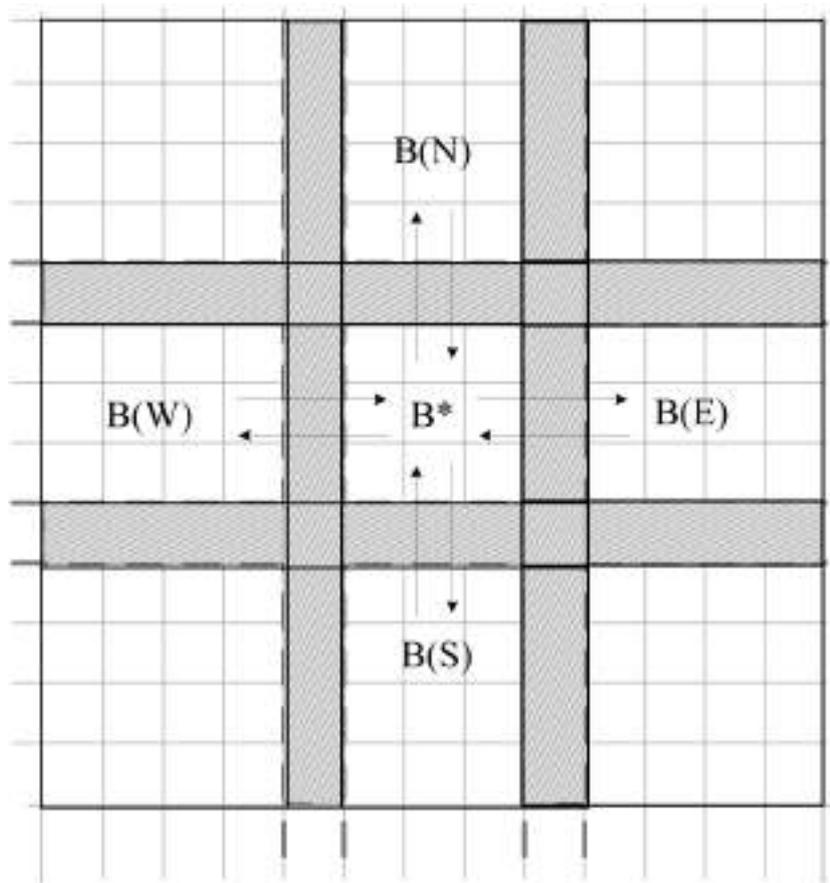


Рис. 2. Направления обмена данными состояний блоков

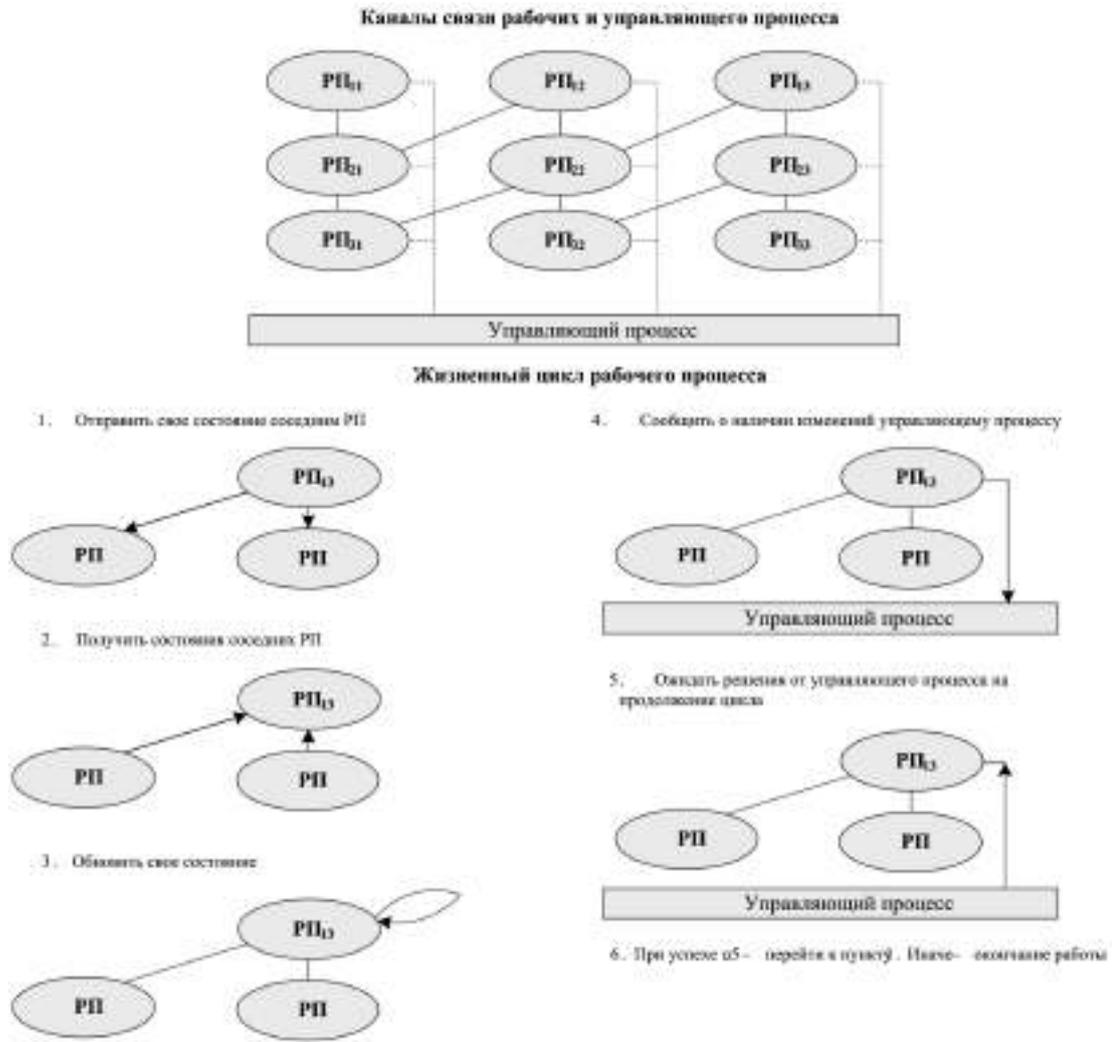


Рис. 3. Схема распределенных вычислений на основе алгоритма пульсации

Шаг 3 цикла включает следующие операции:

1. поэлементно сравнивается вектор значений накопленных затрат в граничных ячейках q_{prev} , вычисленный ранее, с векторами, полученными от соседей. При инициализации вектор q_{prev} заполняется значением ∞ . По результатам сравнения выбирается наименьшее значение.

2. Обновляются значения накопленных затрат для внутренних ячеек блока q_{ij} по следующему правилу:

$$\begin{aligned}
 q_{ij} &= \min \{ q_{ij}^{prev}, q_{ij}^N, q_{ij}^S, q_{ij}^E, q_{ij}^W \} \\
 q_{ij}^N &= \min_{k \in L:B} \{ p_k^N + d_{k,(i^*B+j)}^N \} \\
 q_{ij}^S &= \min_{k \in L:B} \{ p_k^S + d_{k,(i^*B+j)}^S \} \\
 q_{ij}^E &= \min_{k \in L:B} \{ p_k^E + d_{k,(i^*B+j)}^E \} \\
 q_{ij}^W &= \min_{k \in L:B} \{ p_k^W + d_{k,(i^*B+j)}^W \}
 \end{aligned}$$

(6)

где q_{ij}^{prev} – текущее значение накопленных затрат ячейки, вычисленное на предыдущих итерациях;

q_{ij}^N – минимальное значение накопленных затрат при движении в финишную ячейку из стартовой ячейки через северную границу, $q_{ij}^S, q_{ij}^W, q_{ij}^E$ – соответственно, для южной, западной, восточной границ блока.

Выражение (6) представляет собой правило треугольника, примененное к расстояниям до рассматриваемой точки от граничных ячеек блока и от начальной точки поиска.

Таким образом, по построению – на каждой итерации накопленные затраты в каждой ячейке могут либо сокращаться, либо сохранять предыдущее значение, что обуславливает сходимость алгоритма за конечное число шагов. Цель вычислений считается достигнутой, если в течение итерации ни в одном из блоков не было изменений, превышающих заданную величину ε .

Этап 3. Построение общего решения на основе частных решений

Общее решение представляет собой матрицу минимальных накопленных затрат при движении из начальной ячейки во все ячейки области поиска $\underline{Q}_{ij} = \{q_{ij}^k\}, i \in 1:N, j \in 1:M$. Построение требуемых шаговых управлений, доставляющих минимум матрице накопленных затрат, осуществляется обратным ходом метода Беллмана.

Пусть для блока B_k получено частное решение в виде матрицы минимальных накопленных затрат $\underline{Q}_{ij}^k = \{q_{ij}^k\}, i, j \in 1:B$. Обозначим n – номер строки в блоке B_k, m – номер столбца в блоке B_k . Блок B_k имеет индекс h по горизонтали и v по вертикали. Индексы h, v известны и определены на этапе 1. Тогда справедливо соотношение:

$$q_{(B-1)*v+n, (B-1)*h+m} = q_{ij}^k \quad (7)$$

Таким образом, по множеству частных решений можно построить общее решение с использованием соотношения (7).

Анализ требуемых ресурсов

Требования к ресурсам определяются необходимым объемом оперативной памяти для каждого рабочего процесса, временем расчета, количеством рабочих процессов.

Требования к ОЗУ рабочего процесса приближенно определяются соотношением:

$$V = \text{Const}_V * B^3 * U,$$

где B – размер блока,

U – точность вычисления затрат (double:8 байт / float:4 байт / int:2 байта)

Оценка времени расчета для одной итерации

$$T = \text{Const}_T * B^0 * B^2 * P * D(B),$$

где B – размер блока,

B^0 – количество "проходимых" граничных ячеек (коэффициент проходимости $< \infty$),

P – количество блоков, назначенных одному рабочему процессу.

Параметр P определяется дисциплиной назначения блоков рабочим процессам. В простейшем случае, когда блоки распределяются поровну,

$$P = G / P_N,$$

где G – количество блоков, попадающих в расчет,

P_N – количество рабочих процессов.

$D(B)$ – время извлечения матрицы D_i из долговременной памяти в оперативную. В соответствии с описанием, метод предполагает предварительную запись данных в базу данных в процессе предварительного расчета и извлечение части данных, определяемых по критерию поиска, в процессе расчета. Результаты, полученные в ходе предварительного расчета, должны быть записаны в долговременную память. Перед проведением расчета данные необхо-

димо переместить в оперативную память. Длительность данной операции зависит от подсистемы ввода-вывода, используемой технологии (файлы, индексируемые БД). С ростом величины V данный показатель монотонно возрастает.

Для оценки G может быть использовано соотношение (3).

Таким образом, оценки сложности алгоритма включают ряд параметров, определяемые используемой технологией хранения данных, выбором размера блока, количеством блоков в области поиска, архитектурой операционной системы и компьютера (количество одновременно работающих процессов).

При реализации метода необходимо добиться минимизации описанных критериев с учетом значений определяющих факторов.

Применительно к характеру местности, для которой выполняется решение задачи, в условиях более однородной (равнинной) местности значения накопленных затрат будут меняться медленнее, чем для неоднородной (горной). В связи с этим при реализации целесообразно использовать различные комбинации параметров для различных типов исходных картографических данных.

Из описания метода следует, что в процессе вычислений те блоки, по которым не происходит изменения в граничных ячейках, не требуют обновления состояний. Таким образом, в процессе распределенного вычисления такие блоки практически не будут участвовать в расчетах и влиять на временную сложность. Следовательно, метод автоматически адаптируется к структуре данных.

В качестве ориентировочной оценки были получены следующие характеристики метода для задач, описанных в [1]:

- размер области расчетов – 100км*500км;
- характер местности – неоднородный (горный);
- платформа: ОС Linux Red Hat 6.4, CPU – 8 ядер;
- масштаб карты: 1:50000;

Объем ОЗУ для одного блока ~ 1 Мб;

Размер блока – 30 ячеек;

Время расчета маршрута между начальной и конечной точкой (удаленность между точками по прямой – 20 км) ~ 5–7 секунд, требуемый единовременно объем ОЗУ составляет 1 Мб (на каждый из множества слабосвязанных рабочих процессов, выполняемых асинхронно). Время решения данной задачи с помощью метода [1], составляет порядка 50–60 секунд, требуемый единовременно объем ОЗУ составляет 1.4 Гб.

Заключение

В работе описан разработанный автором метод распределенных вычислений для решения класса геоинформационных задач, чувствительных к масштабу и размерности векторов исходных данных. Особенностью метода является заложенная в нем возмож-

ность декомпозиции исходной задачи на слабосвязанные подзадачи с простым алгоритмом решения, что позволяет осуществлять их параллельное исполнение. Общий результат решения автоматически собирается из частных решений.

Показано, что метод обеспечивает сходимость за ограниченное число итераций. Выполнена оценка сложности алгоритма, требований к вычислительным ресурсам, необходимым для решения задачи.

В результате проведения нагрузочного тестирования для сравнительно большой области неоднородной местности (горный участок) метод продемонстрировал существенно более высокую эффективность по сравнению с методом [1].

Литература

1. Дорогов, А. Ю. Итерационный алгоритм расчета транспортной доступности / А.Ю. Дорогов, В.Ю. Лесных, И.В. Раков // Сб. трудов 2-й Российской мультиконференции по проблемам управления. Т. 1 – СПб., 2008. – С.197–202.
2. Эндрюс, Г. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования : [пер. с англ.] / Г. Эндрюс. – М.: Вильямс, 2003. – 470 с.
3. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х. Кормен [и др.] ; пер. с англ. И. Красиков. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2016. — 1328 с.
4. Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход : [пер. с англ.] / С. Рассел, П. Норвиг. – 2-е изд. — М.: Вильямс, 2007. – 1410 с.

Беспилотный летательный аппарат вертолетного типа. Гексакоптер «Меркурий-2»

ЗАО «Институт телекоммуникаций» производит *беспилотные летательные аппараты* с 2005 года как отдельно, так и в составе комплекса площадной съемки.

Назначение комплекса — дистанционное наблюдение местности и построение изображений поверхности земли (тепловизионная и аэрофотосъемка, видеонаблюдение, передача информации в реальном времени). Состав комплекса: БПЛА, аппаратура приема и передачи, АРМ мониторинга.

Основные ТТХ гексакоптера «Меркурий-2»:

- длина/ширина, м: 0,6;
- количество двигателей, шт: 6;
- максимальная взлетная масса, кг: 5,5;
- масса полезной нагрузки, кг: 1,0;
- максимальная скорость, км/ч: 50;
- максимальная высота полета, м: 1000;
- максимальная дальность полета, м: 3000;
- диапазон рабочих температур, °С: от -20 до +40.

Чем мультикоптер отличается от радиоуправляемого вертолета:

- относительная простота конструкций — более высокая надежность;
- винты меньшего размера позволяют добиться большей управляемости и маневренности;
- небольшой размер винтов позволяет существенно снизить вибрации, что позволяет получать качественную картинку с камеры;
- простота ремонта и обслуживания;
- возможность эксплуатации при любой погоде.



Мультикоптер — многороторный летательный аппарат. Аппарат управляется с наземного пункта управления одним оператором. Пункт управления состоит из мобильного компьютера, радиоприемника спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS и приемопередающей аппаратуры. На монитор мобильного компьютера выводятся: цифровая карта местности, координаты местоположения оператора и аппарата, его маршрут и видеоизображение исследуемой поверхности. Платформа для крепления целевой нагрузки универсальна и стабилизирована, позволяет быстро заменять аппаратуру в зависимости от решаемой задачи.

В качестве дополнительной целевой нагрузки возможно размещение на аппарате приборов и датчиков для сбора радиотехнической информации, биологического или химического контроля окружающей среды.

Несмотря на короткую историю мультикоптеры уже нашли себе массу применений. Это съемка продаваемой недвижимости, оценка использования территорий, мониторинг оперативной обстановки, художественная съемка живой природы и многое другое.

Шестироторный коптер «Меркурий-2» отлично подойдет для проведения воздушного мониторинга, съемки с воздуха коммерческих объектов и достопримечательностей, земельных участков, мероприятий.

В состав комплекса входят: вертолет малогабаритный мультироторный, полезная нагрузка (фотоаппарат, видеокамера, тепловизор), наземный пункт управления, набор ЗИП.

Для получения дополнительной информации по беспилотным летательным аппаратам, стоимости и ТТХ, пожалуйста, обратитесь в отдел маркетинга по номеру +7 (812) 740-77-07 или по электронной почте marketing@itain.spb.ru.

Итоги XI Международного ГИС-Форума «Интеграция геопространства – будущее информационных технологий»

19–21 апреля 2017 г. в Подмоскowie состоялся XI Международный ГИС-Форум «Интеграция геопространства – будущее информационных технологий», организованный компанией «Совзонд».

Мероприятие собрало около 350 представителей органов государственного, регионального и муниципального управления, коммерческих компаний, научных и образовательных организаций из России, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Спонсорами мероприятия стали компании DigitalGlobe, Planet, ГК «СКАНЭКС», Tre-Altamira. Информационную поддержку форуму оказали более 30 российских и зарубежных печатных и электронных СМИ, в т.ч. научно-технический журнал «Информация и Космос».

В рамках форума прошло 7 пленарных сессий, на которых участниками было представлено более 50 докладов по самым актуальным проблемам геоинформатики. Особое внимание было уделено перспективам развития геоинформационной отрасли и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), импортозамещению в сфере геоинформационного программного обеспечения, использованию пространственных данных. Большой интерес вызвал круглый стол, посвященный российской группировке спутников ДЗЗ. Значительное место на форуме заняло обсуждение вопросов авиационной съемки, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Много докладов было посвящено ГИС-практике в различных отраслях.

Пленарную сессию «На орбите. Новые группировки спутников ДЗЗ – новый рынок» открыл первый заместитель генерального директора компании

«Совзонд» Михаил Болсуновский. Свое выступление он посвятил новому этапу в развитии геоинформационной отрасли, названному им «Геоиндустрия 4.0». В докладе были проанализированы тенденции, наблюдаемые в дистанционном зондировании Земли, авиационной съемке, использовании БПЛА, обработке данных и сделан прогноз, как будут выглядеть эти сферы через 5 и 15 лет. Какие изменения ждут отрасль геоинформационных технологий и ДЗЗ через 15 лет? Анализ информации будет проводиться в автоматическом режиме (начиная со сбора необходимых данных), произойдет переход к системам с неформальным и интуитивным восприятием заданий с предоставлением пользователю оптимальных вариантов решений на основе динамической пространственной модели.

О новинках отрасли ДЗЗ и ГИС, существующих проблемах, тенденциях развития и будущем отрасли говорили и другие выступающие. Старший директор по развитию каналов продаж компании DigitalGlobe (США) Махер Кури рассказал о стремительных изменениях, происходящих в компании, о новых возможностях, появившихся с запуском спутника WorldView-4. Директор по продажам компании Planet (США) Бланка Паяс рассказала о новых подходах к космическому мониторингу – выполнение ежедневной съемки любого района планеты и доступ клиентов к данным в течение нескольких часов. Директор по глобальным рынкам ГК «СКАНЭКС» Андрей Шумаков ознакомил присутствующих с продуктами и сервисами, предлагаемыми его компанией. Директор Департамента развития и управления государственными информационными ресурсами АПК Минсельхоза России



Игорь Козубенко отметил, что сельское хозяйство за счет использования космического мониторинга и съемки с БПЛА значительно повышает свою конкурентоспособность.

В ходе пленарной сессии «Геоинформатика в госсекторе» о российской наземной инфраструктуре ДЗЗ и ее возможностях рассказал заместитель директора Департамента автоматических космических комплексов и систем ГК «Роскосмос» Валерий Заичко. Он, в частности, отметил, что в настоящее время российская группировка ДЗЗ насчитывает 8 космических аппаратов. В 2016 г. введена в эксплуатацию Единая территориально-распределенная система ДЗЗ (ЕТРИС). В 2017 г. запланированы запуски спутников «Канопус-В-ИК», «Метеор-М» и еще двух КА «Канопус-В».

Пленарная сессия «ГЕО в IT» завершилась дискуссией, организованной интернет-ресурсом TAdviser и посвященной вопросам импортозамещения, экономике и экономии. В ходе дискуссии первый заместитель генерального директора компании «Совзонд» Михаил Болсуновский отметил, что внедрение новых технологий позволяет экономить средства и получать косвенный доход. В качестве примера он привел разработанную компанией систему ГРАДИС, позволяющую муниципальным образованиям увеличивать налогооблагаемую базу, а значит пополнять муниципальный бюджет.

Пленарная сессия «Новейшие геосервисы и технологии» была представлена докладами, посвященными БПЛА, веб-сервисам, обеспечивающим доступ к данным ДЗЗ, и др.

Во второй день форума, 20 апреля, состоялось три пленарных сессии, посвященные новейшим геосервисам и технологиям, внедрению геоинформационных

технологий и использованию данных космической, авиационной и инструментальной съемки. Специалисты компании «Совзонд» рассказали о новых разработках. Это использование радарных космических данных для сельхозмониторинга, система мониторинга изменений на земной поверхности WorldEvolution и др.

В рамках форума прошел круглый стол «Российская группировка спутников ДЗЗ. Оперативность, доступность, возможности обработки». Заместитель начальника Управления автоматических космических комплексов и систем ГК «Роскосмос» Валерий Заичко обстоятельно рассказал о состоянии дел в российской отрасли ДЗЗ, обрисовал перспективы, ответил на многочисленные вопросы. Он отметил, что Роскосмос прикладывает все усилия для того, чтобы обеспечить к 2020 году данными ДЗЗ всех уровней разрешений (высокого, среднего и низкого), получаемых с различных типов аппаратуры (оптической, радиолокационной, инфракрасной, гиперспектральной) всех без исключения отечественных потребителей.

Параллельно пленарным сессиям было проведено 12 семинаров, посвященных самым разным направлениям ГИС и ДЗЗ.

Традиционно состоялся ежегодный конкурс «Лучшие проекты в области ГИС и ДЗЗ». Победителями стали компания «ДАУРИЯ» и Уфимский институт биологии РАН.

В выставке «Техника и технологии» приняли участие российские и зарубежные компании. Новейшие разработки компании «Совзонд» – земельно-имущественная система «ГРАДИС» и российская геоинформационная платформа «Геоаналитика» были представлены на демонстрационных стендах.

Пресс-служба конференции



Авиационная и ракетно-космическая техника

(05.07.00*)

- Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (05.07.02*)
- Наземные комплексы, стартовое оборудование, эксплуатация летательных аппаратов (05.07.06*)
- Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем (05.07.07*)
- Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (05.07.09*)
- Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности (05.07.10*)

раздел

Оптимальное управление взаимным маневром космических аппаратов вдоль линии визирования в орбитальной относительной системе координат

Optimal control of the mutual maneuver of space vehicles along the line of sight in the orbital relative coordinate system

Гончаревский / Goncharevsky V.

Вилен Степанович

(vilenstepan@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор,

заслуженный деятель науки и техники РФ.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ,

почетный профессор.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: взаимный маневр – mutual maneuver; относительная система координат – relative coordinate system; линия визирования – line of sight; энергетические затраты – energy costs.

Статья посвящена отысканию энергетически оптимального управления взаимным маневром космических аппаратов при использовании методов движения вдоль линии визирования. В результате решения вариационной задачи Лагранжа с фиксированными концами получены оптимальные управляющие функции в замкнутой аналитической форме для одного из таких методов – метода орбитального параллельного сближения. Моделирование программ управления позволило сформулировать рекомендации по выбору направления и времени выполнения маневра.

The article is devoted to finding energetically optimal control of the mutual maneuver of space vehicles using the methods of motion along the line of sight. As a result of solving the variational Lagrange problem with fixed ends, optimal control functions have been obtained in closed analytical form for one of such methods – the method of orbital parallel approach. Control programs modeling has allowed to formulate recommendations on the choice of the direction and time of the maneuver.

Методы движения вдоль линии визирования (ЛВ) относятся к методам управления взаимным маневром (ВМ) космических аппаратов (КА), в которых на кинематику их относительного движения (ОД) накладываются определенные ограничения. Суть этих ограничений состоит в том, что программная траектория

в относительной системе координат (ОСК) выбранного типа при любых значениях краевых условий и времени маневра должна представлять собой отрезок неподвижной прямой, проходящей через центры масс КА. Иными словами ОД должно происходить вдоль стабилизированной ЛВ, угловая скорость вращения которой в ОСК поддерживается равной нулю.

В зависимости от типа ОСК, в которой ведется управление ВМ, можно выделить три основных метода:

- движение вдоль ЛВ, стабилизированной в невращающейся ОСК;
- движение вдоль ЛВ, стабилизированной в орбитальной ОСК;
- движение вдоль ЛВ, стабилизированной в ОСК, вращающейся относительно орбитальной ОСК с угловой скоростью пассивного аппарата – цели (ПА-цели).

Если ВМ выполняется для обеспечения сближения КА, то эти методы получили название соответственно методов инерциального параллельного сближения (ИПС), орбитального параллельного сближения (ОПС) и сближения по радиолучу (СРЛ). В первом методе ЛВ стабилизирована в невращающейся ОСК, т.е. в процессе маневра должна быть равна нулю угловая скорость вращения ЛВ в инерциальном пространстве. Во втором методе равна нулю скорость вращения ЛВ относительно орбитальной ОСК. В третьем методе ЛВ стабилизируется в ОСК, вращающейся относительно орбитальной ОСК с угловой скоростью движения ПА-цели, т.е. активный аппарат (АА) в процессе маневра удерживается на ЛВ, соединяющей базовый ПА и ПА-цель, на которых начинается и заканчивается перемещение АА.

Введение рассмотренных ограничений превращает траекторию ОД в вынужденную, что увеличивает энер-

гетические затраты (ЭЗ) на выполнение маневра по сравнению с методами управления, в которых эти ограничения отсутствуют. Поэтому для методов движения вдоль ЛВ особенно актуальна проблема разработки энергетически оптимальных программ и алгоритмов управления ВМ.

Процесс осуществления ВМ при использовании методов движения вдоль ЛВ можно разделить на два следующих друг за другом этапа:

- обеспечение требуемого режима наведения;
- движение вдоль стабилизированной ЛВ.

Основное назначение первого этапа – сведение к нулю начальной угловой скорости вращения ЛВ в ОСК. Кроме того, на этот этап может быть возложено решение таких дополнительных задач как обеспечение требуемого углового положения ЛВ в ОСК, а также обеспечение требуемого значения скорости вдоль стабилизированной ЛВ. Решение этих задач позволяет получить требуемые начальные условия для второго этапа. Специфика задач, решаемых первым этапом, такова, что здесь нет необходимости накладывать какие-либо связи на кинематику ОД, поэтому для управления могут быть использованы методы без ограничений на вид траектории.

В процессе выполнения второго этапа осуществляется движение вдоль стабилизированной ЛВ, завер-

шающееся созданием заданных конечных условий, которые необходимы для решения поставленной перед АА конкретной задачи.

Таким образом, проблема оптимизации управления ВМ при использовании методов движения вдоль ЛВ распадается на две взаимосвязанные задачи:

- отыскание оптимального управления при отсутствии ограничений на вид траектории, которое должно обеспечить требуемые конечные условия, являющиеся начальными условиями для второго этапа процесса управления;
- отыскание оптимального управления, когда на компоненты вектора положения на программной траектории наложены голономные условия связи, обеспечивающие прямолинейность этой траектории в ОСК.

Решение первой задачи изложено в [1]. В настоящей работе приведено решение второй задачи для случая непрерывного управления ВМ, являющегося основным при реализации методов движения вдоль ЛВ. При решении этой задачи примем следующие исходные условия:

- ПА обращается вокруг планеты по круговой орбите с угловой скоростью ω . АА выведен на компланарную орбиту, близкую к орбите ПА;
- ВМ рассматривается в визирной ОСК x_0 , угловая скорость вращения которой относительно орбитальной

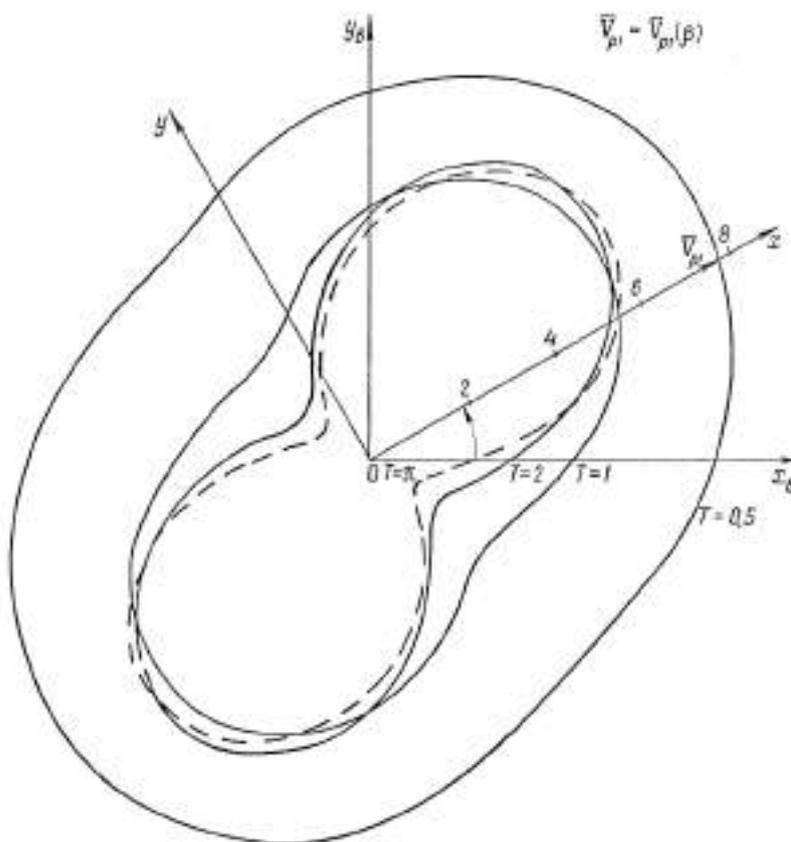


Рис. 1

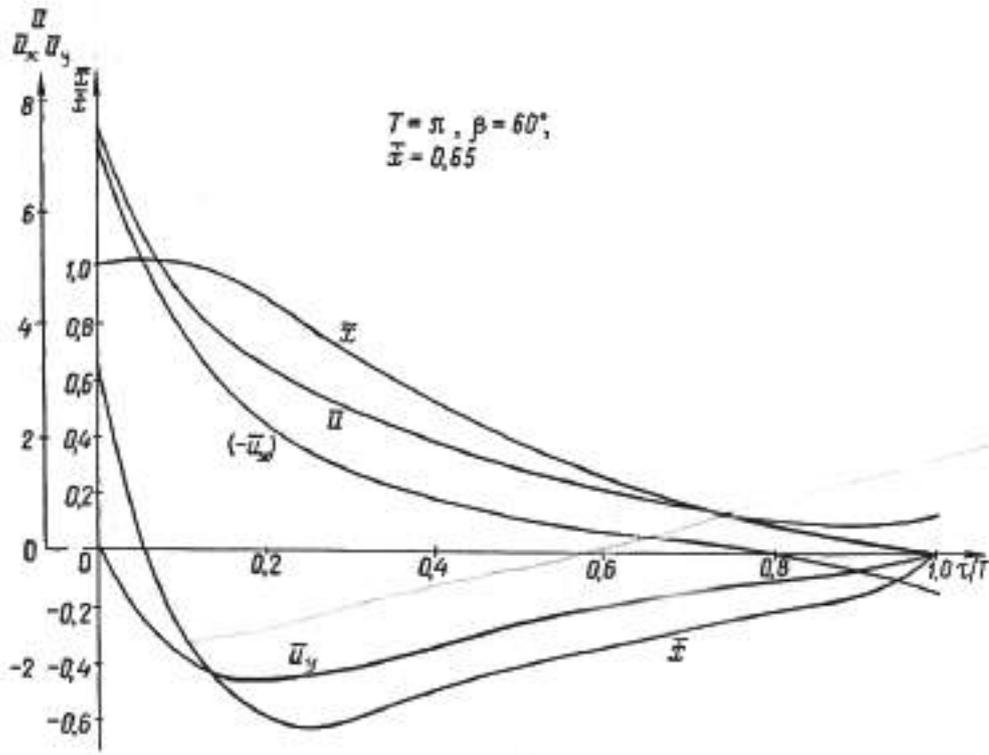


Рис. 2

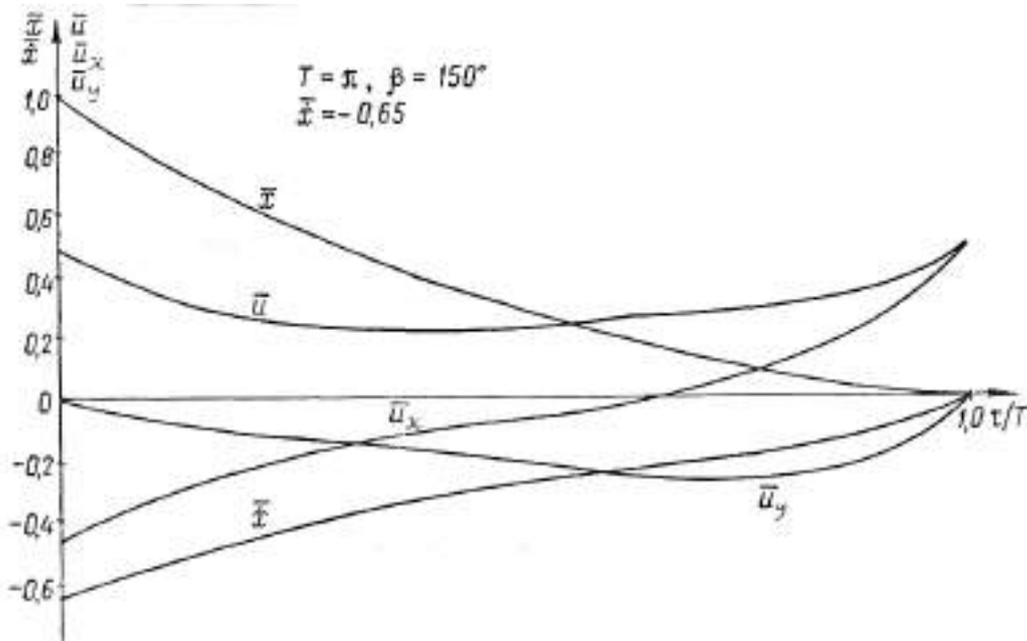


Рис. 3

ОСК равна нулю, что соответствует управлению по методу ОПС. Таким образом, на втором этапе АА движется вдоль ЛВ, стабилизированной в указанной ОСК;

– перед началом второго этапа ликвидируется начальная скорость поперечного ОД по нормали к ЛВ, а также устанавливается требуемое угловое положение ЛВ и требуемое значение скорости вдоль этой линии;

– задается время движения АА вдоль линии визирования T , а в качестве критерия оптимальности управления \bar{u} , обеспечивающего это движение, выбран минимум функционала, характеризующего ЭЗ на выполнение маневра

$$J = \int_0^T F d\tau, \text{ где } F = u^2 = u_x^2 + u_y^2; \quad (1)$$

– предполагается, что для осуществления маневра на АА установлена двигательная установка (ДУ) с тягой, регулируемой как по величине, так и по направлению. В процессе решения задачи ограничений на параметры ДУ, и, следовательно, на управляющие функции не накладывается. Такая постановка задачи позволяет воспользоваться для ее решения методами классического вариационного исчисления [2] и общей методикой, изложенной в работе [3].

Согласно этой методике структура оптимального управления при использовании метода ОПС может быть определена в результате решения вариационной задачи Лагранжа с фиксированными концами, которое можно получить, если удастся найти решение соответствующего уравнения Эйлера-Пуассона. В визирной ОСК с учетом голономных условий связи $y = \dot{y} = \ddot{y} = 0$, накладываемых на кинематику ОД методом ОПС, это уравнение будет иметь вид

$$x^{IV} + l_{11}\ddot{x} + m_{11}\dot{x} + n_{11}x = 0, \quad (2)$$

где

$$l_{11} = -2a_{11} - b_{12}^2, \quad m_{11} = -2(\dot{a}_{11} + b_{12}\dot{b}_{12}), \\ n_{11} = a_{11}^2 + a_{21}^2 - \ddot{a}_{11} + d(a_{21}b_{12})/d\tau$$

коэффициенты, определяемые элементами a_{11}, a_{21}, b_{12} матриц А и В динамической модели ВМ в этой ОСК, описываемой системой уравнений [3]

$$\ddot{x} - a_{11}x = u_x, \\ -a_{21}x + b_{12}\dot{x} = u_y. \quad (3)$$

В системе (3) элементы

$$a_{11} = 3 \sin^2 \beta, \quad a_{21} = 3 \sin \beta \cos \beta, \quad b_{12} = 2, \quad (4)$$

где β – угол, характеризующий направление стабилизированной ЛВ относительно местной вертикали,

являются постоянными величинами [3].

Следовательно, уравнение (2) будет представлять собой линейное дифференциальное уравнение (ЛДУ) четвертого порядка с постоянными коэффициентами. Поэтому его общее решение можно записать в виде

$$x_3(\tau) = \sum_{i=1}^4 C_i \exp r_i \tau, \quad (5)$$

где r_i – корни характеристического уравнения

$$r^4 + l_{11}r^2 + n_{11} = 0. \quad (6)$$

Биквадратное уравнение (6) имеет сопряженные корни

$$r_1 = \sqrt{q_1}, \quad r_2 = \sqrt{q_2}, \quad r_3 = -r_1, \quad r_4 = -r_2, \\ q_1 = -0,5l_{11} + \sqrt{0,25l_{11}^2 - n_{11}}, \quad q_2 = -0,5l_{11} - \sqrt{0,25l_{11}^2 - n_{11}}. \quad (7)$$

Произвольные постоянные C_i определяются из краевых условий

$$x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0, \\ x(T) = x_k, \quad \dot{x}(T) = \dot{x}_k. \quad (8)$$

Интегральная кривая (5) является экстремалью, доставляющей при краевых условиях (8) минимум функционалу (1), так как выполняется условие Клебша-Лежандра $F_{\ddot{x}, \ddot{x}} = 2 > 0$, где $F_{\ddot{x}, \ddot{x}}$ – частная производная подынтегрального выражения функционала по параметру \ddot{x} . Экстремаль представляет собой оптимальный закон перемещения АА вдоль заданного направления ЛВ. Подставив этот закон в левые части уравнений (3), получим искомые оптимальные управления u_{x3} , u_{y3} , обеспечивающие решение поставленной задачи.

$$u_{x3} = (r_1^2 - a_{11})(C_1 e^{r_1 \tau} + C_3 e^{-r_1 \tau}) + (r_2^2 - a_{11})(C_2 e^{r_2 \tau} + C_4 e^{-r_2 \tau}), \\ u_{y3} = C_1(2r_1 - a_{21})e^{r_1 \tau} + C_2(2r_2 - a_{21})e^{r_2 \tau} - C_3(2r_1 + a_{21})e^{-r_1 \tau} - C_4(2r_2 + a_{21})e^{-r_2 \tau}, \\ r_1 = \sqrt{a+b}, \quad r_2 = \sqrt{a-b}, \quad a = a_{11} + b_{12}, \quad b = \sqrt{a_{11}^2 + b_{12}^2}.$$

Управление u_{x3} обеспечивает перемещение АА вдоль ЛВ, а управление u_{y3} удерживает его на этом направлении. Если движение осуществляется вдоль местной горизонтали ($\beta = 0$), то уравнение (2) имеет особое решение

$$x_3(\tau) = C_1 + C_2 \tau + C_3 e^{2\tau} + C_4 e^{-2\tau},$$

а оптимальные управляющие функции

$$u_{x3} = 4(C_3 e^{2\tau} + C_4 e^{-2\tau}), \quad u_{y3} = 2(C_2 + C_3 e^{2\tau} - 2C_4 e^{-2\tau}).$$

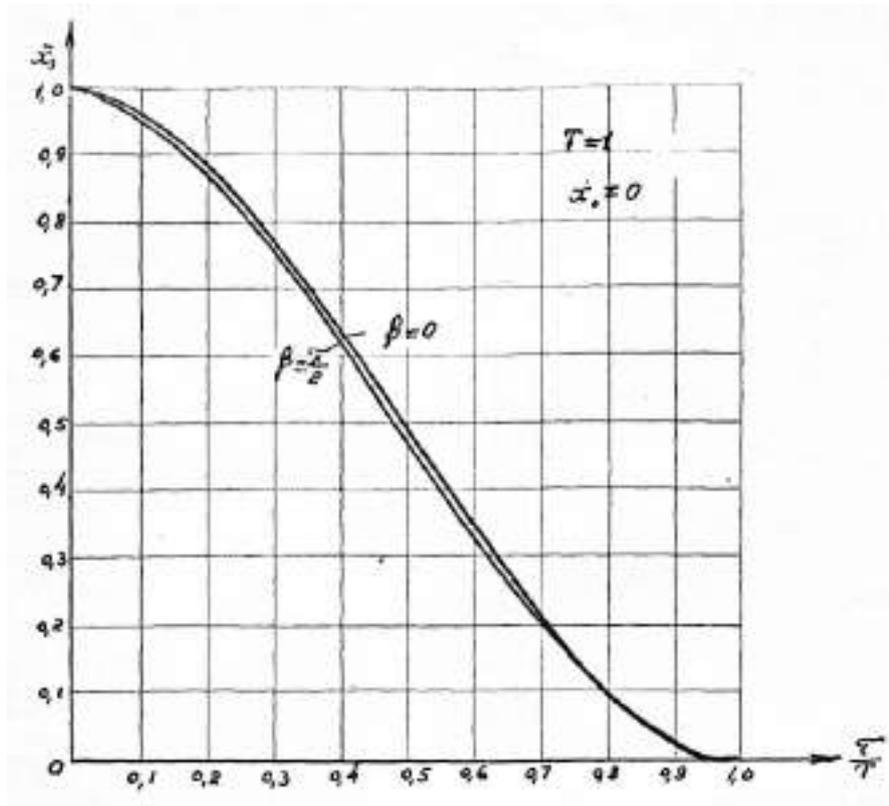


Рис. 4

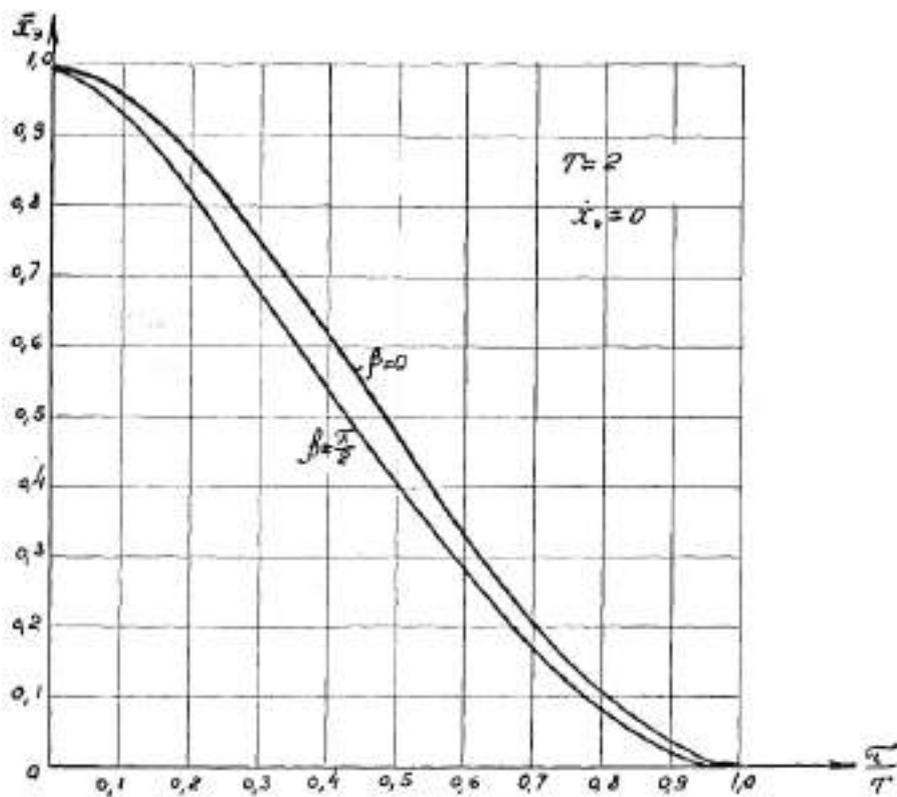


Рис. 5

Из соотношений, определяющих оптимальное управление \bar{u} видно, что оно зависит от краевых условий и времени выполнения ВМ. Для выяснения характера этой зависимости и определения, наиболее благоприятных с точки зрения ЭЗ, направления и времени маневра было проведено моделирование оптимальных программ, что позволило получить численные значения управления \bar{u} , и требуемой характеристической скорости $V_{p1} = \int_0^T |\bar{u}_3| dt$ для различных краевых условий и времени маневра. Некоторые результаты моделирования для случая сближения с мягким контактом при начальных орбитах аппаратов, близким к круговым, представлены на рис. 1...3 (здесь индекс « - » означает нормирование величины по начальной дальности x_0) и справедливы для любых начальных условий по дальности (в пределах принятых в работе допущений) и любых высот орбиты ПА. Для определения значения управления u'_x и V'_{p1} для конкретной орбиты, характеризующейся величиной ω , и конкретного начального расстояния x_0 , необходимо воспользоваться соотношениями $u' = \omega^2 u$, $V'_p = \omega V_p$, где $u = x_0 \bar{u}$, $V_p = x_0 \bar{V}_p$. На рис. 2...3 показан характер изменения составляющих оптимального управления u_x и u_y , а также расстояния \bar{x} и скорости $\dot{\bar{x}}$ в процессе маневра для $T = \pi$ и двух направлений ЛВ $\beta = 60^\circ$ (направление с наибольшими ЭЗ) и $\beta = 150^\circ$ (направление с наименьшими ЭЗ). Зависимость V_{p1} от направления сближения при различном времени T иллюстрируется рис. 1. Видно, что при уменьшении T значения V_{p1} увеличиваются и становятся мало зависящими от направления сближения. С ростом T эта зависимость усиливается. Это объясняется тем, что здесь маневр выполняется с малым уровнем тяги, сравнимым с разностным гравитационным ускорением, влияние которого зависит от относительного положения аппаратов. Видно также, что наиболее благоприятными направлениями с точки зрения ЭЗ при $T > 1$ можно считать $\beta \approx 30^\circ$, $\beta \approx 150^\circ$. С этой точки зрения время маневра целесообразно задавать в пределах $1 \leq T \leq \pi$. При таком выборе T получаются достаточно малые уровни требуемых u_{\max} и приемлемые значения ЭЗ на маневр и функционирование системы ориентации. Выбор больших значений T не приводит к значительному уменьшению этих величин, а для ряда направлений, как это видно из рис. 1, наоборот дает некоторое их увеличение. Кроме того, с ростом T будут увеличиваться ЭЗ в системе ориентации АА.

Результаты моделирования экстремали (5) для различных краевых условий и времени маневра показывают, что эта интегральная кривая в рассматриваемом интервале времени $T < \pi$ слабо зависит от направления сближения. Наглядным доказательством этого являются графики, построенные на рис. 4...5 для случая компланарного сближения с мягким контактом. На этих рисунках изображены кривые для $\beta = 0$ и $\beta = 90^\circ$ (экстремали для остальных значений β лежат между ними). Видно, что экстремали при $T < 2$ практически совпа-

дают и только при $T > 2$ появляется ощутимая разница между ними. Следовательно, для небольших T можно, по-видимому, использовать программы управления, которые получаются путем подстановки в правую часть уравнений для составляющих управления \bar{u} экстремалей, не зависящих от направления сближения, что значительно упростит вид управления \bar{u} .

Одной из таких экстремалей является интегральная кривая

$$x(\tau) = C_1 + C_2 \tau + C_3 \tau^3 + C_4 \tau^4, \quad (9)$$

полученная для случая движения аппаратов в свободном пространстве [4]. Подстановка соотношения (9) в левую часть уравнений (3) дает квазиоптимальную программу управления

$$\begin{aligned} u_x &= 2C_3 - a_{11}C_1 + (6C_4 - a_{11}C_2)\tau - a_{11}(C_3 + C_4\tau)\tau^2, \\ u_y &= b_{12}C_2 - a_{21}C_1 + (2b_{12}C_3 - a_{21}C_2)\tau + [3b_{12}C_4 - a_{21}(C_3 + C_4\tau)]\tau^2. \end{aligned}$$

Исключая из экстремали (9) и ее первой производной переменную, получим аналитическое выражение для фазовой траектории, определяющей закон управления вдоль ЛВ

$$x = (3 + \bar{x}_0 T)^3 (2 \mp 3A^{1/2} \pm A^{3/2}) / (2 + \bar{x}_0 T)^2, \quad (10)$$

где $A = 1 + \bar{x}_0 T (2 + \bar{x}_0 T) / (3 + \bar{x}_0 T)^2$.

Если $\bar{x}_0 = -2/T$, то уравнение (10) принимает вид

$$\bar{x} = k\sqrt{\bar{x}},$$

где $k = \bar{x}_0$, т.е. из соотношения (10), как частный случай, вытекает хорошо известный квадратичный параметрический закон управления сближением КА вдоль ЛВ.

Литература

1. Гончаревский, В. С. Оптимальное непрерывное управление взаимным маневром космических аппаратов без ограничений на вид траектории в орбитальной относительной системе координат / В.С. Гончаревский // Информация и Космос. – 2016. – № 1. – С. 143–147.
2. Гельфанд, И. М. Вариационное исчисление / И.М. Гельфанд, С.В. Фомин. – М.: Физматгиз, 1961. – 228 с.
3. Гончаревский, В. С. Методы и алгоритмы управления относительным движением космических аппаратов / В.С. Гончаревский. – МО РФ, 1998. – 87 с.
4. Гончаревский, В. С. Оптимальные программы управления относительным движением космических аппаратов в свободном пространстве / В.С. Гончаревский // Информация и Космос. – 2012. – № 1. – С. 110–112.

Методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники

Technique for ensuring the reliability of the results of metrological expertise of rocket and space technology samples

Гусеница / Gusenitsa Y.

Ярослав Николаевич

(yaromir226@mail.ru)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени

А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

преподаватель кафедры метрологического

обеспечения вооружения, военной

и специальной техники.

г. Санкт-Петербург

Новиков / Novikov A.

Александр Николаевич

(novalloll@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

доцент кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: метрологическая экспертиза – metrological examination; субъективность оценок – subjectivity of evaluations; уровень компетентности – level of competence; автоматизированное рабочее место – workstation.

Проведен анализ существующего научно-методического обеспечения, используемого при проведении метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники. Представлена методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники, позволяющая, в отличие от существующих, учесть субъективность оценок, а также уровень компетентности метрологов-экспертов. Данная методика может быть реализована в виде программного обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта, которое по мере участия каждого привлекаемого эксперта позволит корректировать и вырабатывать обоснованное решение о выявленных несоответствиях при проведении метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники.

The analysis of the existing scientific and methodological support used in the metrological examination of rocket and space technology samples has been carried out. The technique of ensuring the reliability of the results of metrological expertise of rocket and space technology samples has been presented, which, in contrast to existing ones, allows taking into account the evaluations subjectivity, as well as the level of metrologists-experts' competence. This methodology can be implemented in the form of software for the expert metrologist workstation, which, at each involved expert participation, will allow correcting and producing an informed decision about the detected discrepancies during the metrological examination of rocket and space technology samples.

Введение

Современный этап развития геополитической обстановки в мире характеризуется острым сопер-

ничеством ведущих стран мира за сферы влияния, источники сырья и рынки сбыта. Данная тенденция затрагивает различные сферы деятельности Российской Федерации, в том числе и космическую отрасль.

Успешность развития космической отрасли зависит от дееспособности, надежности и готовности к применению ракетно-космической техники. Достижение высоких значений перечисленных характеристик возможно только при условии реализации всего комплекса мероприятий метрологического обеспечения образцов ракетно-космической техники на всех этапах их жизненного цикла, начиная с исследований и обоснования разработки и заканчивая снятием с эксплуатации и утилизацией [1, 2]. При этом определяющее значение на начальных стадиях жизненного цикла образцов ракетно-космической техники отводится метрологической экспертизе, под которой понимается анализ и оценка правильности принятых решений по метрологическому обеспечению, направленных на обеспечение единства, требуемой точности измерений и достоверности контроля параметров технического состояния и тактико-технических характеристик образцов ракетно-космической техники.

Вместе с тем анализ существующего научно-методического обеспечения проведения метрологической экспертизы показывает, что оно не учитывает новые условия контроля «метрологического совершенства» образцов ракетно-космической техники [3–5]. В частности, существующие методики не учитывают субъективность оценок, а также уровень компетентности метрологов-экспертов, которые оказывают существенное значение на результаты метрологической экспертизы. Кроме того, в настоящее время фактически отсутствуют методики, реализующие системный подход в обеспечении достоверности результатов метрологической экспертизы при формировании состава экспертной группы, получении индивидуальных и

групповых оценок результатов определения несоответствий, расчете и оценивании показателей достоверности результатов метрологической экспертизы.

Таким образом, разработка методики обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники, позволяющей учесть субъективность индивидуальных оценок метрологов-экспертов, уровень их компетентности при формировании групповых оценок, а также реализовать комплексное оценивание показателей достоверности результатов метрологической экспертизы, является весьма актуальной задачей.

Содержание методики

Предлагаемая методика подразумевает наличие следующих этапов, представленных на рис. 1 [6]:

1. Определение требований к достоверности результатов и продолжительности метрологической экспертизы.
2. Формирование состава экспертной группы.
3. Определение недостатков образца ракетно-космической техники.
4. Получение индивидуальных оценок результатов определения недостатков.
5. Получение групповых оценок результатов определения недостатков.
6. Расчет показателей достоверности результатов метрологической экспертизы.
7. Оценивание показателей достоверности результатов метрологической экспертизы.
8. Формирование достоверных результатов метрологической экспертизы.

Определение требований к достоверности результатов и продолжительности метрологической экспертизы представляет собой установление допустимых значений показателей достоверности результатов и продолжительности метрологической экспертизы. Выбор данных значений осуществляется представителями заказчика.

Формирование состава экспертной группы подразумевает привлечение потенциальных экспертов, являющихся специалистами в области метрологического обеспечения ракетно-космической техники. При этом на основе критериев и шкал, представленных в табл. 1, каждый j -й эксперт оценивается коэффициентом компетентности с помощью следующего выражения [6]:

$$q_j = \frac{\sum_{l=1}^L \theta_{jl}}{\sum_{l=1}^L \theta_{l\max}}$$

где θ_{jl} – вес j -го эксперта по l -му критерию; $\theta_{l\max}$ – предельный вес l -го критерия; L – общее количество критериев.

Численность группы экспертов определяется из условия [6]:

$$\xi \leq m \leq \frac{3 \cdot \sum_{j=1}^J q_j}{2 \cdot q_{\max}}, \quad (1)$$

где $q_{\max} = 1$ – максимально возможное значение коэффициента компетентности экспертов; ξ – количество задач, решаемых образцом ракетно-космической техники.

Если условие (1) не выполняется, то в экспертную группу привлекается еще один или несколько экспертов. В результате формируется экспертная группа, которая характеризуется матрицей-строкой компетентности:

$$Q = (q_j)_{j=1..J} = (q_1, q_2, \dots, q_J).$$

Определение несоответствий осуществляется на основе индивидуального ознакомления каждого j -го эксперта с образцом ракетно-космической техники. При этом каждый j -й эксперт для каждого обнаруженного им i -го недостатка фиксирует его и выставляет индивидуальную оценку $p_{ij} \in [0, 1]$. Эта оценка является субъективной вероятностью нахождения i -го недостатка в указанном месте и отражает степень уверенности в этом j -го эксперта.

Определение недостатков осуществляется исходя из ограничений на время проведения метрологической экспертизы с использованием следующего критерия класса пригодности:

$$i = \overline{1, I}; \quad (T^{\Delta} \leq T),$$

где T^{Δ} – допустимая продолжительность метрологической экспертизы; T – фактическая продолжительность метрологической экспертизы.

Результатом определения недостатков является матрица субъективных вероятностей:

$$P = (p_{ij})_{i=1..I, j=1..J} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1J} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{I1} & p_{I2} & \dots & p_{IJ} \end{pmatrix}.$$

Получение индивидуальных оценок результатов определения несоответствий осуществляется путем преобразования матрицы субъективных вероятностей в матрицу индивидуальных оценок, учитывающих уровень компетентности экспертов:

$$W = (w_{ij})_{i=1..I, j=1..J} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1J} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{I1} & w_{I2} & \dots & w_{IJ} \end{pmatrix}.$$

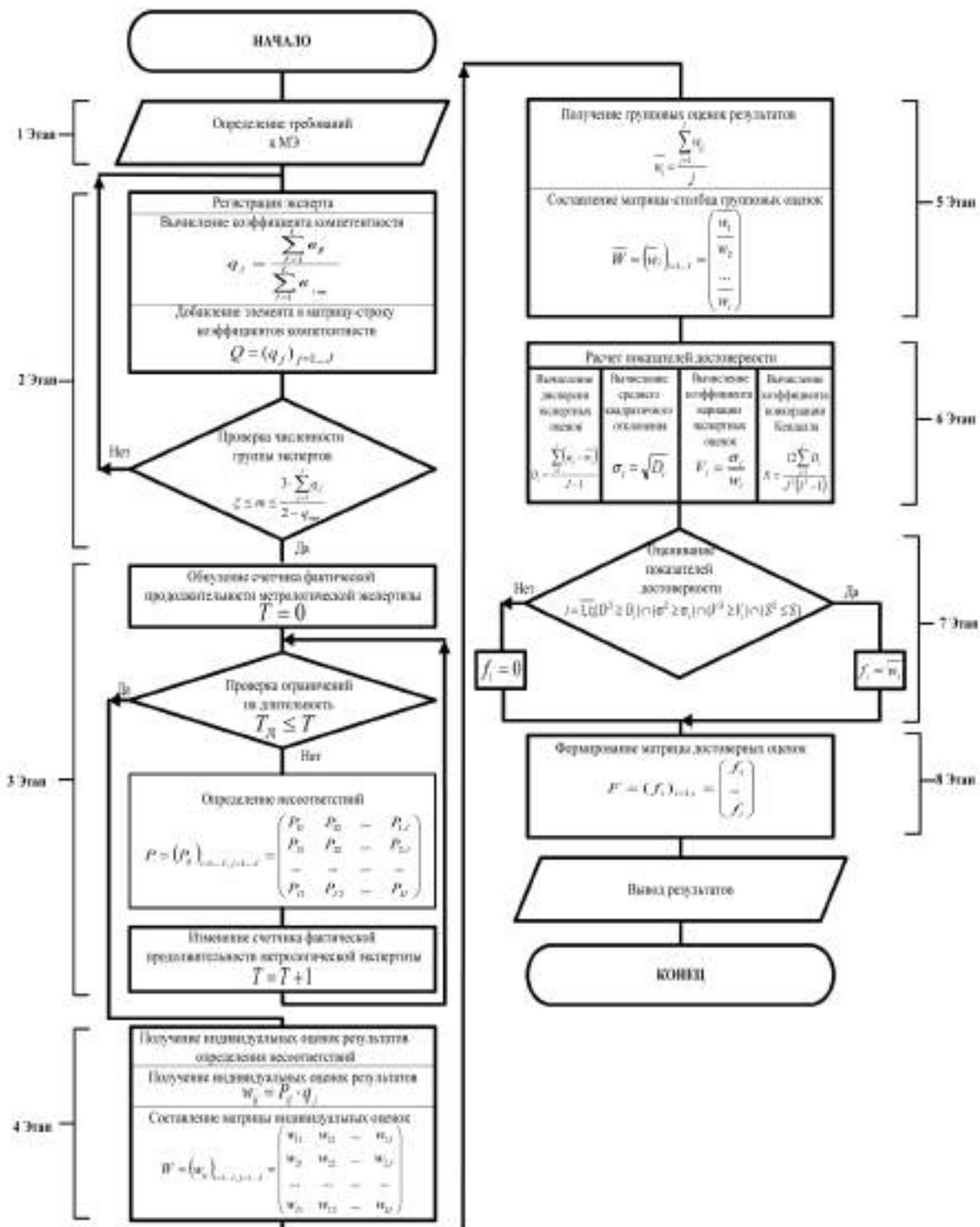


Рис. 1. Структура методики обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники

Таблица 1

Критерии и шкалы для оценки уровня компетентности экспертов

Критерий Вес	Уровень образования	Занимаемые должности	Количество проведенных экспертиз	Опыт работы в области метрологической экспертизы
1	Бакалавр	Младший научный сотрудник, научный сотрудник	До 4	До 2 лет
2	Специалист	Старший научный сотрудник, преподаватель	От 4 до 8	От 2 до 4 лет
3	Магистр	Начальник лаборатории, старший преподаватель	От 8 до 12	От 4 до 6 лет
4	Кандидат наук	Заместитель начальника отдела, доцент, профессор	От 12 до 16	От 6 до 8 лет
5	Доктор наук	Начальник отдела, начальник кафедры, заместитель начальника кафедры	Более 16	Более 8 лет

Для этого элементы матрицы субъективных вероятностей и матрицы-строки компетентности подставляются в следующее выражение:

$$w_i = \sum_{j=1}^J P_{ij} \cdot q_j \cdot$$

Получение групповых оценок результатов определения недостатков осуществляется посредством преобразования матрицы индивидуальных оценок в матрицу-столбец групповых оценок:

$$\bar{W} = (\bar{w}_i)_{i=1..I} = \begin{pmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \dots \\ \bar{w}_I \end{pmatrix} \cdot$$

Для этого элементы матрицы индивидуальных оценок подставляются в следующее выражение:

$$\bar{w}_i = \frac{\sum_{j=1}^J w_{ij}}{J} \cdot$$

Полученные групповые оценки характеризуют групповое мнение экспертов о недостатках.

Оценивание достоверности результатов метрологической экспертизы подразумевает получение дополнительной статистической информации о результатах метрологической экспертизы. В качестве такой информации выступают [6]:

- дисперсии экспертных оценок;
- среднеквадратические отклонения экспертных оценок;
- коэффициенты вариации экспертных оценок;
- коэффициент конкордации Кендалла.

Дисперсии экспертных оценок являются абсолютными характеристиками разбросанности значений индивидуальных оценок относительно групповых. Данные величины рассчитываются по следующей формуле:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^J (w_{ij} - \bar{w}_i)^2}{J - 1} \cdot$$

Дисперсии групповых оценок имеют размерность квадрата групповой оценки. Поэтому для наглядной абсолютной характеристики рассеивания индивидуальной оценки, размерность которой совпадает с размерностью групповой оценки, используются среднеквадратические отклонения экспертных оценок. Данные величины рассчитываются по следующей формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{D_i} \cdot$$

Коэффициенты вариации экспертных оценок являются относительными характеристиками разбросанности значений индивидуальных оценок относительно групповых.

Данные величины рассчитываются по следующей формуле:

$$v_i = \frac{\sigma_i}{\bar{w}_i} \cdot$$

На основе значений дисперсий, среднеквадратических отклонений и коэффициентов вариации экспертных оценок подтверждается достоверность результатов метрологической экспертизы.

Коэффициент конкордации Кендалла характеризует согласованность экспертов между собой, т.к. позволяет количественно определить область группового мнения. Данная величина рассчитывается по следующей формуле:

$$S = \frac{12 \sum_{i=1}^I D_i}{J^2 (I^3 - 1)} \cdot$$

Коэффициент конкордации Кендалла S принимает значение в пределах от 0 до 1. Значение $S = 1$ означает полную согласованность мнений экспертов, $S = 0$ – полную несогласованность. Низкое значение этого коэффициента свидетельствует об отсутствии общности мнений экспертов и требует повторного проведения метрологической экспертизы.

Оценивание показателей достоверности результатов метрологической экспертизы осуществляется с использованием следующего критерия класса пригодности:

$$i = \bar{1}, I; (D^{\Delta} \geq D_i) \wedge (\sigma^{\Delta} \geq \sigma_i) \wedge (v^{\Delta} \geq v_i) \wedge (S^{\Delta} \leq S_i), \quad (2)$$

где D^{Δ} – допустимое значение дисперсии экспертных оценок; σ^{Δ} – допустимое значение среднеквадратического отклонения экспертных оценок; v^{Δ} – допустимое значение коэффициента вариации экспертных оценок; S^{Δ} – допустимое значение коэффициента конкордации Кендалла.

Формирование достоверных результатов метрологической экспертизы предполагает формирование матрицы-столбца достоверных оценок:

$$F = (f_i)_{i=1..I} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_i \end{pmatrix} \cdot$$

Элементы данной матрицы формируются из матрицы-столбца групповых оценок. Для этого

используется условие (2). Если какой-нибудь элемент матрицы-столбца групповых оценок удовлетворяет условию (2), то значение этого элемента становится значением элемента матрицы-столбца достоверных оценок:

$$f_i = \overline{w}_i.$$

В противном случае элементы матрицы-столбца достоверных оценок принимают нулевые значения:

$$f_i = 0.$$

Заключение

Представленная методика может быть реализована в виде программного обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта, которое по мере участия каждого привлекаемого эксперта позволит корректировать и вырабатывать обоснованное решение о выявленных недостатках при проведении метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники.

Литература

1. Положение о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов (утв. Постановлением Правительства РФ от 22 июля 1998 года № 819-31).
2. Чапоргин, В. С. Состояние и перспективы развития системы метрологического обеспечения ракетно-космической техники / В.С. Чапоргин, Д.В. Панов, П.М. Поморцев // Мир измерений. – 2013. – № 9. – С. 3–7.
3. РМГ 63–2003 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации. – М. Стандартиформ, 2003.
4. МИ 32/004–2004 Порядок проведения метрологической экспертизы программы и методик аттестации испытательного оборудования и технических систем (комплексов) полигона или испытательной организации. – М. Стандартиформ, 2004.
5. Швыдун, В. В. Актуальные вопросы организации работ по метрологической экспертизе вооружения и военной техники / В.В. Швыдун // Военная мысль. – 2008. – № 2. – С. 55–58.
6. Совершенствование нормативно-методических документов министерства обороны российской федерации по метрологической экспертизе образцов вооружения и военной техники : рабочие материалы по СЧ КНИР «Авдотка-2015» / ВКА имени А.Ф. Можайского ; А.Н. Кравцов [и др.]. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. – 59 с. – Инв. №8716-РМ.

Математическое моделирование теплообмена основных элементов энергетического оборудования космических аппаратов

Heat exchange mathematical modeling of the basic elements of spacecraft power equipment

Горшков / Gorshkov L.

Лев Капитонович
(maneb@mail.ru)
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
профессор кафедры механики
г. Санкт-Петербург

Мосин / Mosin D.

Дмитрий Александрович
(mosin-da@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник кафедры космических аппаратов и средств
межорбитальной транспортировки.
г. Санкт-Петербург

Тютюкин / Tyutyukin A.

Александр Евгеньевич
(alex.tyutyukin@list.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Уртминцев / Urtmintsev I.

Игорь Александрович
(urt_eg@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
доцент кафедры космических аппаратов и средств
межорбитальной транспортировки.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космический аппарат – spacecraft; энергетическая система – power system; математическая модель – mathematical model; факторы космического полета – factors of space flight.

Рассмотрена унифицированная модель энергетической системы (ЭС) космического аппарата (КА), содержащая в своей структуре минимальный набор функциональных элементов. Разработаны математические модели теплообмена основных элементов энергетического оборудования космических аппаратов с учетом положения центра масс КА и их углового положения. Анализ модели ЭС позволяет выполнить обоснование рациональной структуры ЭС перспективного КА.

A unified model of the energy system (ES) of a spacecraft (SC), containing in its structure a minimal set of functional elements, has been considered. Heat exchange mathematical models of the main elements of the spacecraft power equipment have been developed taking into account the position of the center of mass spacecraft and their angular position. The analysis of the ES model makes it possible to justify the rational structure of the ES of a prospective spacecraft.

Энергетическая система (ЭС) космических аппаратов (КА) является важным элементом конструкции, обеспечивающим генерацию и распределение энергетических потоков различной природы (электрических, тепловых, механических) в целевые и обеспечивающие агрегаты. Любой рабочий процесс сопряжен с тепло-

выделением в агрегатах КА, а поддержание заданного теплового режима требует организации теплообмена с отведением избытка теплоты в космическое пространство. Полное всестороннее рассмотрение этой задачи требует привлечения большого количества разнообразных исходных данных.

На этапе предварительного моделирования КА представляет интерес оценивание энергетических показателей функционирования целевых и обеспечивающих систем и всего комплекса в целом на основе минимального объема информации о предполагаемых задачах и особенностях жизненного цикла. В этом случае целесообразно рассматривать некоторую унифицированную модель ЭС, содержащую в своей структуре минимальный набор функциональных элементов, отражающих взаимосвязи энергетических источников различной природы.

Решению этой задачи посвящена данная работа. Предполагается, что в результате анализа такой модели может быть выполнено обоснование рациональной структуры ЭС перспективного КА [1].

Общая характеристика энергетической системы КА

Условия функционирования КА, определяющие его энергетический баланс, определяются совокупным влиянием следующих факторов:

а) собственного теплового излучения элементов конструкции;

б) прямого солнечного излучения, отраженного элементами конструкции;

в) солнечного излучения, отраженного от Земли в направлении на КА и переотраженного элементами его конструкции;

г) теплового излучения Земли в направлении на КА и переотраженного элементами его конструкции.

В зависимости от положения на орбите вклад компонентов б)...г) в излучение КА может существенно изменяться.

Текущий тепловой режим КА обусловлен совокупным влиянием факторов а)...г) и предысторией развития тепловых процессов в элементах его конструкции. Поэтому обоснованные суждения о характеристиках теплового состояния КА можно получить только на основе анализа всей совокупности внешних и внутренних энергетических воздействий на него в процессе полета по конкретной орбите в текущий отрезок времени. Тем не менее иногда возникают задачи анализа функционирования КА с неизвестным составом бортового оборудования и задачами функционирования. В этом случае следует опираться на общие энергетические закономерности применительно к наблюдаемым особенностям полета.

Внешние энергетические воздействия на КА зависят от его орбиты, текущего астрономического времени, ориентации в пространстве корпуса и СБ, влияния магнитного поля Земли. Достаточно корректный расчет теплового режима КА возможен на основе создания реалистичной тепло-энергетической модели, учитывающей наиболее общие структурные компоненты объекта [2, 3].

Модель энергосистемы КА

В целом КА представляет собой комплекс панельно-ферменных конструкций, образующих замкнутые и открытые объемы, содержащие сосредоточенные агрегаты бортового оборудования (БО). Для описания теплового режима КА, как правило, нет необходимости знать устройство и работу агрегатов, но важно знать их объемы и массы, потребляемую энергию – E_A и КПД – η_A , обобщенные теплофизические характеристики – рабочую температуру – T_A и теплоемкость – c_A , а также циклограммы работы. Плотность заполнения внутренних объемов корпуса КА может заметно сказаться на характере теплообмена в объеме и между агрегатами.

Корпусные оболочки КА выполняются тонкостенными, подкрепленными силовым каркасом в виде рам, переборок и шпангоутов, к которым крепятся агрегаты БО. При анализе теплового режима оболочек теплоперенос вдоль стенок, как правило, незначителен, и им можно пренебречь. Более важно учитывать поперечный теплоперенос через толщину стенок.

Оболочка КА обычно закрывается экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ), а иногда теплозащитными покрытиями (ТЗП), существенно препятству-

ющими теплообмену через стенки корпуса. Изнутри ЭВТИ (ТЗП) сдерживает тепловой поток от БО через стенки, а снаружи – теплоприток от внешних источников. Такая конструкция корпуса позволяет поддерживать тепловой режим КА в контролируемых и прогнозируемых границах. Для корректного расчета теплообмена в этом случае необходимо знать тепловые сопротивления – R композиционных структур типа ЭВТИ, ЭВТИ+стенка, ТЗП, ТЗП+стенка.

Снаружи корпуса КА зачастую располагаются радиаторы системы термостатирования и теплоотвода. В существующих конструкциях объектов теплоотвод осуществляется радиационным путем, но известны случаи дополнительного применения на борту тепловых аккумуляторов и испарительных систем теплосброса в условиях пиковых нагрузок.

В качестве первичного источника электроэнергии в настоящее время используются исключительно солнечные батареи (СБ), но были примеры применения и ядерных энергоустановок с термоэлектрическими и термоэмиссионными преобразователями тепловой энергии в электричество.

В настоящее время широкое распространение получили КА открытой каркасной конструкции. Такие КА имеют ферму, на которой закреплены приборные отсеки целевых и обеспечивающих систем, имеющие самостоятельные элементы теплосброса, не связанные единым контуром теплообмена.

КА в процессе полета по орбите, как правило, ориентированы в пространстве таким образом, чтобы целевая аппаратура могла выполнить свои задачи с минимальными энергозатратами на функционирование. Это обстоятельство, в свою очередь, вызывает необходимость периодической ориентации панелей СБ на Солнце для питания бортовой аппаратуры и подзарядки аккумуляторных батарей. Пространственные эволюции КА вокруг центра масс или СБ при слежении за Солнцем приводят к накоплению избыточного кинетического момента, компенсация которого осуществляется с помощью двигательных установок (ДУ) или специальных магнитных систем, взаимодействующих с магнитным полем Земли.

Исходя из законов сохранения энергии, импульса и момента импульса можно сделать некоторые обоснованные суждения об энергетике наиболее значимых операций. В контексте решаемых задач наибольшее значение имеет учет энергозатрат на движение КА с учетом ориентации его СБ и, возможно, ориентацию его целевых систем относительно центра масс.

Рассмотрим варианты расчета энергозатрат на выполнение таких операций.

А. Ориентация корпуса КА на центр Земли (по радиус-вектору его положения на орбите) при полете по эллиптической орбите.

Механическая мощность, необходимая для разворота корпуса КА в орбитальной системе координат (Орб СК), равна

$$P_M = J_Z \cdot \Omega_Z \cdot \ddot{\vartheta};$$

$$\Omega_Z = \int \ddot{\vartheta}(t) \cdot dt,$$

где

J_Z – момент инерции КА относительно оси $Z_{\text{ОрбСК}}$;
 Ω_Z – текущая угловая скорость вращения КА относительно оси $Z_{\text{ОрбСК}}$;

$\ddot{\vartheta}$ – угловое ускорение радиус-вектора, отражающее перемещение КА по эллиптической орбите.

Б. Ориентация корпуса КА на точку на поверхности Земли радиуса R_E , лежащую в плоскости орбиты. Расчет выполняется по предыдущим формулам, однако угловое ускорение вращения КА вокруг оси зависит от параметров траектории и линии визирования. В частности, для круговой траектории полета КА на высоте H и наблюдении точки на Земле в пределах угла $\pm\varphi_0$, можно получить следующие выражения

– текущий угол положения КА на орбите φ

$$\varphi = -\varphi_0 + \Omega_{\text{Orb}} t,$$

где Ω_{Orb} – угловая скорость движения по орбите,

t – время от начала операции наблюдения;

– длина линии визирования L

$$L = \sqrt{(R_E + H)^2 + R_E^2 - 2 \cdot (R_E + H) \cdot R_E \cdot \cos \varphi};$$

– угол ϑ направления L относительно радиус-вектора положения КА

$$\vartheta = \arcsin\left(\frac{R_E}{L} \cdot \sin \varphi\right).$$

Дифференцируя последнее выражение по времени, получим формулу для текущего значения угловой скорости вращения КА вокруг оси $Z_{\text{ОрбСК}}$ – Ω_Z

$$\Omega_Z = \frac{R_E \cdot \cos \varphi}{L \cos \vartheta} \cdot \Omega_{\text{Orb}}.$$

Выполнив дифференцирование второй раз, получим выражение для углового ускорения КА вокруг оси $Z_{\text{ОрбСК}}$

$$\ddot{\vartheta} = \text{tg} \vartheta \cdot \Omega_Z^2 - \frac{R_E \cdot \sin \varphi}{L \cos \vartheta} \cdot \Omega_{\text{Orb}}^2.$$

В этом варианте требуется перевести КА из основной ориентации в исходное положение в начальной точке слежения и вернуть в основное состояние после выполнения операции наблюдения. Эти действия также сопряжены с энергозатратами.

На первом этапе представляется, что в состав бортового оборудования КО целесообразно включить следующие очевидные элементы, рис. 1:

– СБ – солнечная батарея традиционного панельного типа, генерирующая электрическую мощность РСБ;

– СЭП – система электропитания, содержащая комплекс электропреобразователей для питания бортовых потребителей;

– АБ – аккумуляторная батарея;

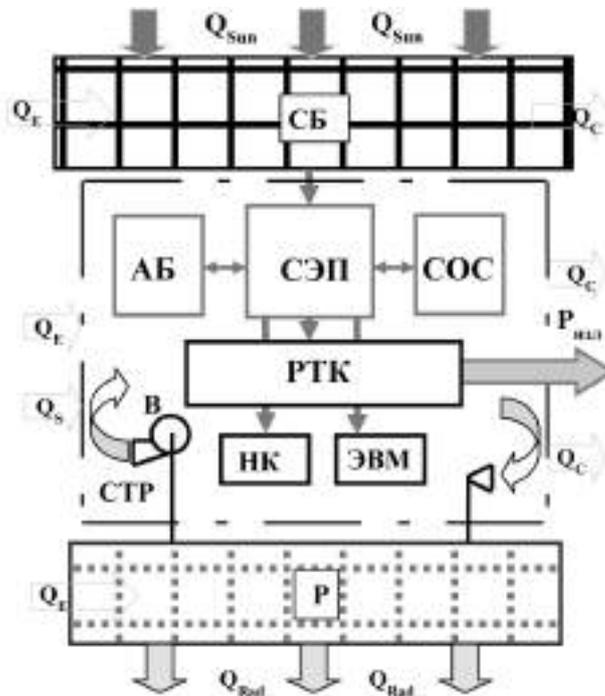


Рис. 1. Расчётный вариант энергосистемы КА

– БО – бортовое оборудование (целевая аппаратура – радиотехнический комплекс (РТК), характеризующийся излучаемой мощностью – P_{IR} и КПД преобразования – η_{IR} ; обеспечивающие системы – навигационный комплекс + бортовая ЭВМ);

– СОС – система ориентации и стабилизации КА на основе маховично-гироскопического устройства, характеризующаяся затратами механической мощности на выполнение маневра – P_{GSSM} с соответствующим КПД – η_{GSSM} и затратами электрической мощности на разгрузку и подкратку МГУ с КПД – η_{GSSE} , то есть на компенсацию энергопотерь на ориентацию и стабилизацию. На некоторых КА применяется электромагнитная система управления движением вокруг центра масс и компенсации избыточного кинетического момента аппарата. Функционирование такой системы основано на взаимодействии магнитного поля Земли с магнитными полями, создаваемыми специальными соленоидами, вынесенными за пределы корпуса КА. Эта система достаточно энергозатратна и требует наличия на борту специальной аппаратуры [2, 3];

– СТР – система терморегулирования, выполняющая задачу по отводу тепла, выделяемого бортовыми системами.

Можно принять, что СЭП, АБ, БО (кроме антенны) и СОС находятся в общем герметичном энергоизолированном отсеке, вентилируемом продувкой газа через объем отсека и радиаторы СТР. Иногда радиаторы дублируют и подключают в работу те секции, которые в наименьшей степени подвержены внешним энергетическим воздействиям в текущий период полета КО.

В общем случае на КА поступают радиационные энергопотоки от Солнца Q_{Sun} и Земли Q_E , а отводится энергия тепловым излучением от радиаторов Q_{Rad} и наружных элементов конструкции Q_C . При этом, как указано выше, основной энергообмен осуществляется через СБ и радиаторы.

В открытой конструкции КА единая система теплоотвода может отсутствовать. В этом случае энергонасыщенные агрегаты могут иметь свою терморегулирующую аппаратуру, включая теплообменники и радиаторы теплоотвода в космическое пространство.

3 Расчет теплового режима КА в полете

Расчет теплового режима КА в полете представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку высока неопределенность знания внутренней структуры, состава и технических характеристик его агрегатов и систем. В такой ситуации на практике можно сделать обоснованные суждения только на основе общих энергетических балансных соотношений с минимальным углублением в конкретные физические процессы. Поэтому большинство внутренних элементов конструкции КА рассматриваются в виде параллелепипедов и цилиндров, наделяемых набором массовых и теплофизических параметров, отражающих предполагаемую целевую задачу функционирования. Именно на такой основе базируются модели тепловых режимов конкретных КА, рассматриваемых далее [4].

3.1 Модель солнечной батареи

Модель энергообмена в СБ показана на рис. 2. В представленном варианте рассматривается фрагмент

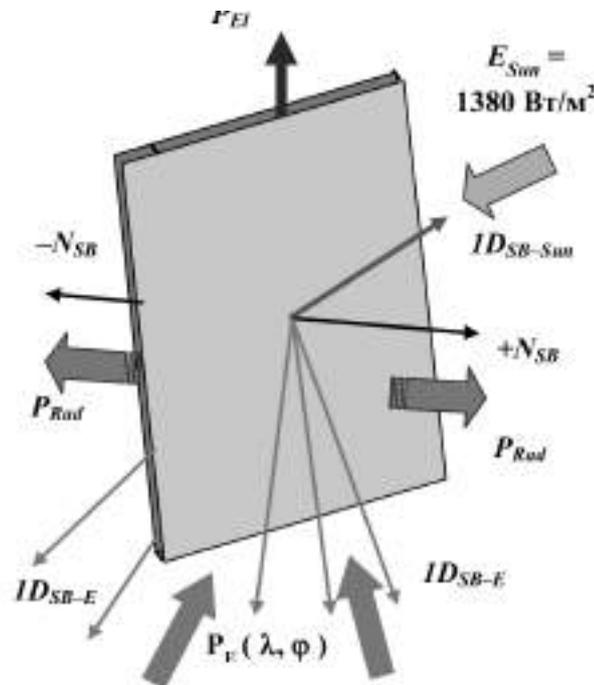


Рис. 2. Модель энергообмена в солнечной батарее

плоской панели. На фронтальной стороне панели, обращенной к Солнцу, расположены солнечные элементы, а на тыльной – элементы силовой поддержки. Современные СБ КА имеют силовой каркас из графитоэпоксидных речных элементов с сетеполотном или сотовые панели.

Внешними факторами энергетического воздействия на СБ являются солнечное излучение, характеризующееся постоянной E_{Sun} , и тепловое излучение Земли – P_E . От батареи отводится радиационный тепловой поток P_{Rad} и электроэнергия P_{El} . Собственными теплофизическими характеристиками СБ являются температура T и средняя теплоемкость C .

Дифференциальное уравнение энергетического баланса СБ имеет вид

$$C \cdot \rho \cdot A_{SB} \frac{dT}{dt} = P_{Sun} + P_E - P_{Rad} - P_{El},$$

где

ρ – удельная масса батареи, кг/м³;

A_{SB} – площадь поверхности.

Составляющие энергетических потоков равны

Мощность солнечного излучения

$$P_{Sun} = a_S \cdot E_{Sun} \cdot (\vec{N}_{SB} \cdot \vec{1}_{SB-Sun}) \cdot A_{SB},$$

где

a_S – коэффициент поглощения солнечного излучения;

в скобках – скалярное произведение единичных векторов нормали к панели СБ и направления на Солнце.

Мощность теплового излучения Земли, вычисляемого как сумма вкладов от теплового излучения с площадей элементов разбиения подстилающей поверхности, наблюдаемых из данной точки поверхности СБ в пределах телесного угла видимости каждой площадки

$$P_E = a_S \cdot \sum_i [Q_{Ei} \cdot \Omega_i \cdot (\vec{N}_{SB} \cdot \vec{1}_{SB-E}) \cdot A_{SB}],$$

где

a_S – коэффициент поглощения поверхностью панели теплового излучения от Земли, разный для солнечной и тыльной сторон;

Q_{Ei} – плотность теплового потока с i -го элемента разбиения подстилающей поверхности, вычисляемая по формуле Стефана-Больцмана при температуре поверхности Земли T_E ;

Ω_i – телесный угол наблюдения i -го элемента разбиения подстилающей поверхности Земли;

в скобках – скалярное произведение единичных векторов нормали к панели и направления на i -й элемент поверхности Земли.

Мощность теплового излучения СБ, имеющей температуру T , с обеих сторон

$$P_{Rad} = (\varepsilon_S + \varepsilon_B) \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A_{SB},$$

где

$\varepsilon_S, \varepsilon_B$ – коэффициенты теплового излучения поверхности СБ с солнечной и обратной сторон;

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Электрическая мощность, развиваемая СБ на освещенном Солнцем участке траектории полета КА,

$$P_{El} = \eta_{CB} \cdot E_{Sun} \cdot (\vec{N}_{SB} \cdot \vec{1}_{SB-Sun}) \cdot A_{SB} \cdot K_{SEP},$$

где

η_{CB} – полный КПД солнечной батареи;

K_{SEP} – коэффициент потребления электроэнергии от СБ системой электроснабжения КА.

3.2 Модель пассивного элемента энергосистемы

Пассивными считаются элементы энергосистемы, не участвующие в энергообмене с окружающей средой вне КА и не управляющие его ориентацией. В качестве таковых могут рассматриваться агрегаты бортового оборудования: аккумуляторная батарея (АКБ), система электропитания (СЭП), бортовые комплексы навигации, приема, передачи и обработки информации и т.п. Некоторые из этих агрегатов потребляют электроэнергию со 100% преобразованием в теплоту. Эта теплота может рассеиваться в окружающие элементы конструкции, такие как оболочка, корпус. Но возможен и теплоподвод от тех же элементов при их нагреве от внешних источников, например от Солнца. Такой теплообмен может осуществляться радиационным или конвективным механизмом. Выделяющееся в пассивном элементе тепло также может отводиться системой теплоотвода, размещенной внутри самого агрегата.

Модель энергообмена в пассивном элементе энергосистемы КА показана на рис. 3. Согласно модели, к элементу подводится электроэнергия мощностью P_{El} , а отводится в систему теплоотвода Q_{PS} . При отсутствии теплообмена через боковую поверхность элемента ($P_{Hi} = 0$) выполняется равенство $P_{El} = Q_{PS}$. Но в общем случае оно может быть нарушено в ту или иную сторону.

Модель энергообмена в пассивном элементе энергосистемы КА показана на рис. 3. Согласно модели, к элементу подводится электроэнергия мощностью P_{El} , а отводится в систему теплоотвода Q_{PS} . При отсутствии теплообмена через боковую поверхность элемента ($P_{Hi} = 0$) выполняется равенство $P_{El} = Q_{PS}$. Но в общем случае оно может быть нарушено в ту или иную сторону.

Таким образом, дифференциальное уравнение энергобаланса элемента имеет вид

$$C \cdot M \cdot \frac{dT}{dt} = P_{El} - Q_{PS} + P_{Hi},$$

где

C, M – теплоемкость и масса элемента конструкции;

T – средняя температура элемента.

Тепловой поток, подводимый к объекту извне (или отводимый вовне), равен

$$P_{\text{Ит}} = [\alpha_c \cdot (T - T_{\text{ext}}) + \epsilon_R \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{\text{ext}}^4)] \cdot A_R,$$

где

α_c – коэффициент конвективного теплообмена системы элемент – окружающая конструкция, имеющая среднюю температуру T_{ext} ;

ϵ_R – коэффициент теплового излучения системы элемент – окружающая конструкция;

A_R – поверхность теплообмена.

3.3 Модель активного элемента энергосистемы

Активным считается элемент конструкции, в котором подведенная электроэнергия расходуется на выполнение механической работы управления движением КА вокруг центра масс. Модель активного элемента показана на рис. 4.

Здесь дифференциальное уравнение энергобаланса дополнено слагаемым, учитывающим энергозатраты на выполнение механической работы по развороту КА вокруг какой-либо его главной оси – N_{mec}

$$C \cdot M \cdot \frac{dT}{dt} = P_{\text{El}} - Q_{\text{PS}} + P_{\text{Ит}} - N_{\text{mec}},$$

где

$$N_{\text{mec}} = J_{\text{ax}} \cdot \dot{\Omega}_{\text{ax}} \cdot \frac{d\dot{\Omega}_{\text{ax}}}{dt}.$$

Данное слагаемое рассмотрено выше. Здесь имеет место существенная сложность, связанная с неопре-

деленностью КПД преобразования электроэнергии в механическую работу – η_{mec} . Можно положить, что $\eta_{\text{mec}} = 0,5$, а половина подведенной электроэнергии преобразуется в тепло.

Смысл остальных слагаемых аналогичен рассмотренным выше.

3.4 Модель теплообмена в радиаторе (холодильнике) КА

Рассматриваются панельные радиаторы плоской формы или изогнутые вокруг одной какой-либо конструкционной оси. Предполагается, что в типовой ориентации КА на орбите радиатор в минимальной степени подвержен воздействию солнечной радиации и теплового излучения Земли. Вполне возможна установка на КА двух и более радиаторов, переключаемых по ситуации.

Как было указано ранее, энергетическая модель КА формулируется только на основе уравнений энергетического баланса. В частности, для системы теплообмена не конкретизируются вид теплоносителя и механизмы теплообмена в элементах конструкции. Расчетная модель теплообмена в радиаторе показана на рис. 5.

Тепловое излучение панели радиатора может быть в одном направлении или в двух взаимно противоположных, как показано на рисунке. Предполагается, что возможны все факторы внешних воздействий на панель: излучение от Солнца и Земли. Расчетная модель в значительной степени напоминает модель энергобаланса СБ (за вычетом процесса генерации электроэнергии).

Основное уравнение – это дифференциальное уравнение энергетического баланса радиатора

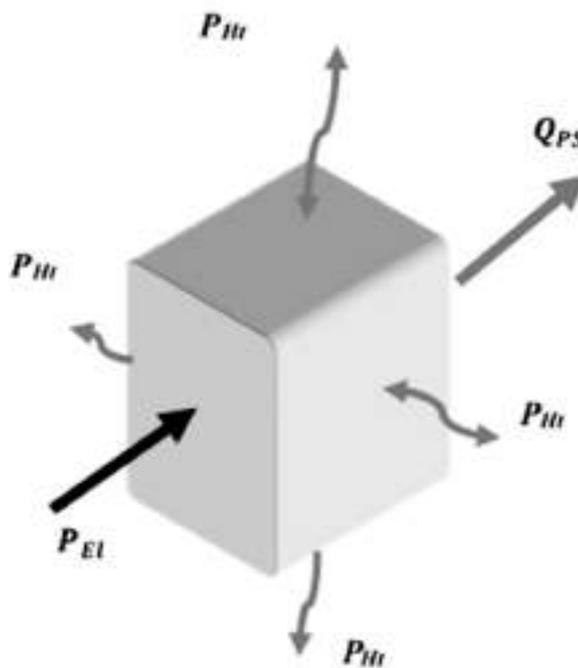


Рис. 3. Модель теплообмена в активном элементе

$$C \cdot M \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{PS} + P_{Sun} + P_E - P_{HR},$$

где

C, M – теплоемкость и масса радиатора;

Q_{PS} – тепловой поток, подводимый к радиатору от всех систем КА;

P_{HR} – тепловой поток, излучаемый радиатором по закону Стефана-Больцмана при температуре T во взаимно противоположных направлениях

$$P_{HR} = 2 \cdot \epsilon_R \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A_R.$$

Слагаемые влияния внешних источников нагрева рассмотрены выше.

3.5 Энергетический баланс КА

Энергетический баланс КА складывается из суммы источников внешнего нагрева: Солнце, Земля и источников внутреннего нагрева, преобразующих электроэнергию в теплоту в процессах функционирования систем КА. В общем виде уравнение энергетического баланса КА можно представить в следующей форме

$$P_{SB} + P_{AC} + P_H - P_{RH} = 0,$$

где P_{SB} – мощность, генерируемая СБ;

P_{AC} – мощность, передаваемая на зарядку аккумуляторной батареи или отдаваемая ею в СЭП КА;

P_H – мощность источников внешнего нагрева от Солнца и Земли;

Ясно, что каждое слагаемое уравнения баланса существенно зависит не только от текущего положения КА на орбите, но и от обрабатываемой им на этом этапе программы полета. Программа полета заранее

неизвестна, однако некоторые модельные варианты могут быть проанализированы, и на их основе сделаны выводы о тепловом облике КА, включающем температурные поля наружных элементов конструкции. В свою очередь, знание температурных полей, а также положения и ориентации КА на орбите относительно Солнца и Земли позволяет рассчитать их отражательно-излучательные и спектро-энергетические характеристики, как в форме объемных индикатрис, так и в интересующих направлениях визирования.

В состав системы уравнений теплообмена входит система дифференциальных уравнений локального энергобаланса отдельных элементов конструкции

$$\sum_j [c_j \cdot M_j \cdot \frac{dT_j}{dt} = P_{El} - P_{mecj} - Q_{PSj}].$$

Слагаемые в квадратных скобках определяют вклад в общий энергетический баланс процессов в отдельных агрегатах КА, характеризуемых собственными коэффициентами преобразования электроэнергии в тепло. В предыдущих пунктах рассмотрены соответствующие дифференциальные уравнения энергетического баланса основных агрегатов. Эти уравнения позволяют рассчитать динамику развития тепловых процессов в элементах и определить величины отводимого тепла.

Сумма всех тепловых потоков от внутренних элементов конструкции должна быть отведена излучением в окружающее пространство с помощью радиатора.

$$P_{RH} = \sum_j Q_{PSj}.$$

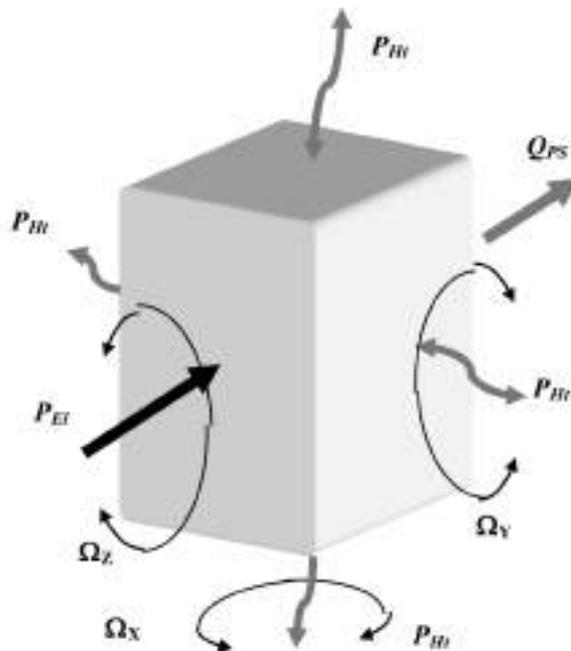


Рис. 4. Модель теплообмена в активном элементе

Конкретизация уравнений энергетического баланса должна быть выполнена на этапе разработки модели соответствующего КА.

Заключение

Разработаны математические модели теплообмена основных элементов энергетического оборудования космических аппаратов с учетом положения центра масс КА и их углового положения.

Учтены все источники тепловых потоков в уравнениях баланса теплообмена бортовых элементов.

Энергетические характеристики элементов КА в орбитальном полёте могут быть учтены при моделировании выполнения КА конкретных целевых задач.

3. Гуцин, В. Н. Основы устройства космических аппаратов / В.Н. Гуцин. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.

4. Каменев, А. А. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве / А.А. Каменев, Е.И. Лаповок, С.И. Ханков. – СПб, 2006. – 186 с.

Литература

1. Фаворский, О.Н. Вопросы теплообмена в космосе / О.Н Фаворский, Я.С. Каданер. – М.: Высшая школа, 1972. – 280 с.

2. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. А.В. Солодова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1977. – 430 с.

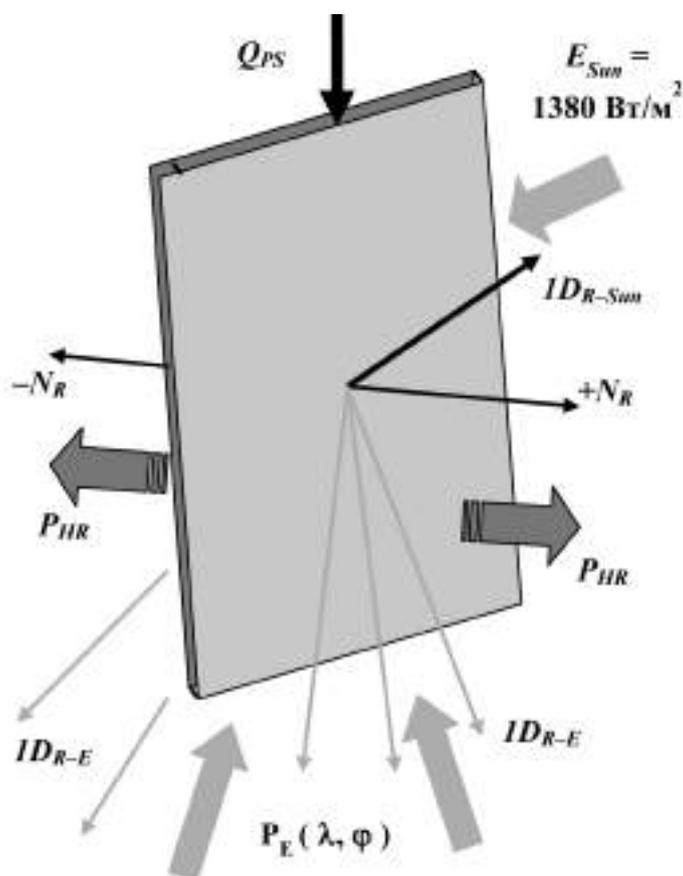


Рис. 5. Модель теплообмена в радиаторе (холодильнике)

Выбор оптимальной компоновочной схемы и архитектуры бортовой кабельной сети наноспутника SamSat-QB50

Selection of the SamSat-QB50 optimal layout scheme and on-board cable network architecture

Устюгов / Ustyugov E.

Ефим Владимирович

(efim163@gmail.com)

ФГАОУ ВО «Самарский национальный

исследовательский университет имени академика

С. П. Королева»,

ассистент межвузовской кафедры космических

исследований.

г. Самара

Ключевые слова: наноспутник – nanosatellite; аэродинамический стабилизатор – aerodynamic stabilizer; бортовая кабельная сеть – on-board cable network; компоновочная схема – layout scheme; бортовые системы – on-board subsystem.

В статье предлагается методика выбора оптимальной топологии бортовой кабельной сети на примере наноспутника SamSat-QB50, и решается задача выбора оптимальной компоновки, исходя из предлагаемых критериев. Рассмотренные критерии оптимальности топологии бортовой кабельной сети и компоновочной схемы составлены на основе опыта разработки и изготовления наноспутников. Демонстрируется разработанная методика выбора компоновочной схемы с учётом требований бортовой аппаратуры и возможностей стандарта CubeSat. В статье приводятся описание бортовых систем наноспутника SamSat-QB50, описание принципов их работы и массовые характеристики, что позволяет наглядно показать и обосновать причины выбора нужной компоновки. Топология бортовой кабельной сети представлена графом, состоящим из подграфов бортовых систем и рёбер между разъёмами этих систем. Показываются методика сокращения выборки возможных топологий бортовой кабельной сети и критерии выбора работоспособных топологий. Также приводится окончательная компоновочная схема и схема бортовой кабельной сети наноспутника SamSat-QB50 на этапе готовности к лётным испытаниям.

The article suggests a technique for selecting the optimal topology of the on-board cable network using the SamSat-QB50 nanosatellite as an example, and the problem of choosing the optimal layout has been solved based on the proposed criteria. The considered criteria for the optimality of the topology of the onboard cable network and the layout scheme have been compiled on the basis of experience in the development and manufacture of nanosatellites. The developed method of the layout scheme selection has been demonstrated, taking into account the requirements of on-board equipment and the capabilities of the CubeSat standard. The article gives a description of the SamSat-QB50 nanosatellite onboard subsystem, their operation principles and the mass characteristics, which makes it possible to clearly demonstrate and justify the reasons for choosing the desired layout. The topology of the onboard cable network has been represented by a graph consisting of the onboard systems subgraphs and ribs between the connectors of these subsystem. The method of the sample of possible topologies reducing of the on-board cable network and the criteria for selecting operational topologies have been shown. In addition, the final layout diagram and the circuit of the on-board cable network SamSat-QB50 on the stage of readiness for flight-testing have been given.

Традиционно положению центра масс наноспутника уделяется мало внимания, однако при использовании низкоэффективного аэродинамического стабилизатора положение центра масс становится одной из ключевых характеристик. Величина создаваемого аэродинамическим стабилизатором управляющего момента прямо пропорциональна запасу статической устойчивости, который определяется геометрией наноспутника и положением его центра масс. Положение центра масс в свою очередь зависит от компоновочной схемы наноспутника.

Рассматриваемый в статье наноспутник SamSat-QB50 разработан и изготовлен в Самарском национальном исследовательском университете имени академика

С. П. Королёва в рамках участия в международном проекте QB50 Project. Наноспутник предназначен для исследования параметров верхней термосферы Земли на высотах от 400 км и до входа в плотные слои атмосферы. Согласно требованиям бортовой научной аппаратуры, наноспутник должен обеспечивать ориентацию своей продольной оси по вектору скорости набегающего потока с точностью $\pm 10^\circ$. В целях экономии энергии было принято решение использовать пассивный аэродинамический стабилизатор в качестве вспомогательного блока системы управления движением. Задачей аэродинамического стабилизатора является поддержание ориентации продольной оси наноспутника в требуемом секторе.

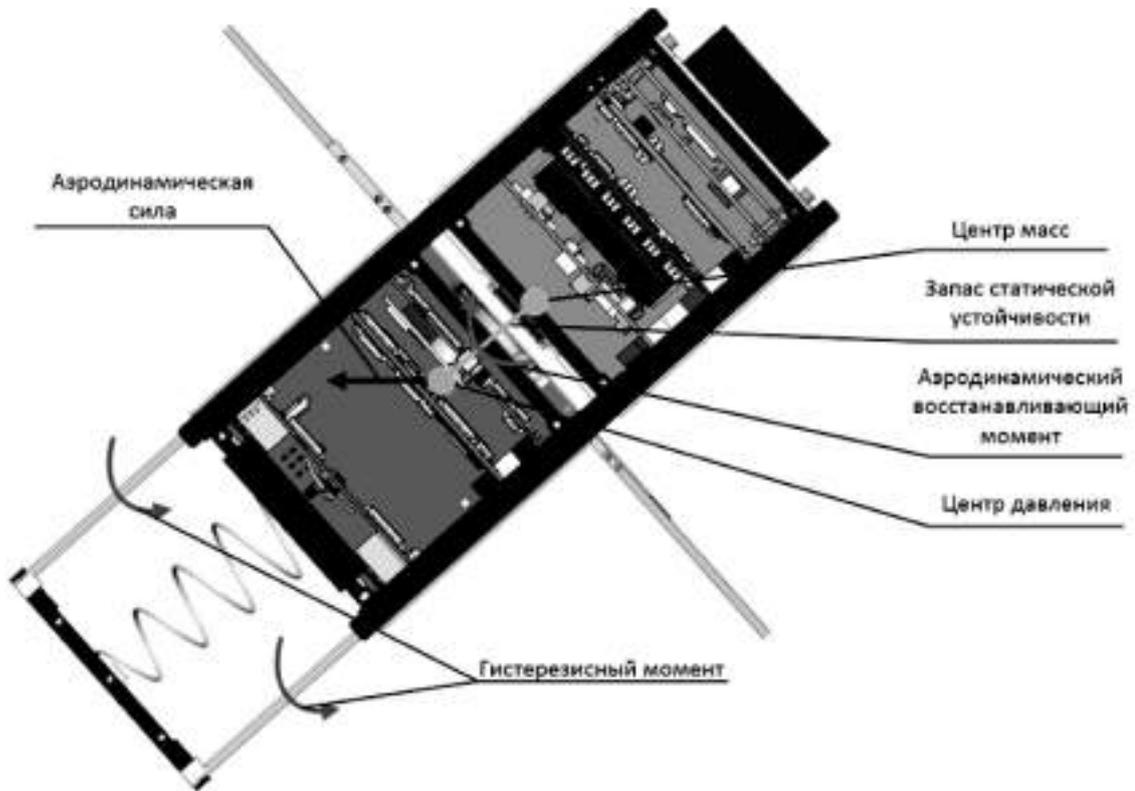


Рис. 1. Внешний вид наноспутника SamSat-QB50

В патенте [1] описан критерий достижения требуемой ориентации с заданной вероятностью при использовании аэродинамического стабилизатора описанной конструкции. Очевидно, что увеличение запаса статической устойчивости положительно скажется на точности обеспечения ориентации. Поэтому требуется обеспечить не только требуемое значение запаса статической устойчивости, но и сделать его максимальным с учётом конструктивных и эксплуатационных ограничений. Из рис. 1 видно, что аэродинамический стабилизатор наноспутника SamSat-QB50 представляет собой дополнительное закрытое пространство в хвостовой части, смещающее центр давления относительно центра масс. Длина аэродинамического стабилизатора ограничена исходя из конструктивных соображений, поэтому задача обеспечения минимально требуемого запаса статической устойчивости решается путём смещения центра масс наноспутника за счёт выбора компоновочной схемы. Максимальная масса наноспутника ограничена 2 кг, согласно пусковому соглашению, поэтому размещение дополнительных масс в носовой части наноспутника также ограничено.

Говоря о компоновочной схеме нельзя забывать о бортовой кабельной сети (БКС), так как наноспутники, в отличие от классических космических аппаратов, имеют высокую плотность упаковки (например средняя плотность наноспутника SamSat-QB50 составляет 880 кг/м³), поэтому при проектировании БКС крайне важно удовлетворить требования по эргономике наноспутника. Таким образом, задача разработки опти-

мальной компоновочной схемы и схемы БКС заключается в обеспечении максимального запаса статической устойчивости, обеспечении работоспособности наноспутника и оптимизации топологии БКС. Под оптимизацией топологии БКС в статье понимается поиск оптимальной согласно предложенному ниже интегральному критерию оптимальности.

Критерий минимизации относительной длины БКС

Самый первый и очевидный критерий оптимизации – это минимизация массы БКС [2], который с учётом допущений удобнее заменить на критерий минимизации длины БКС, представленный в безразмерном виде и относённый к характерному размеру наноспутника:

$$\min(L), L = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{H}$$

где L – суммарная относительная длина всех кабелей, l_i – длина i -го кабеля, H – характерный размер наноспутника (например, для 2U – 227 мм, для 3U – 340,5 мм)

Критерий оптимизации количества межстековых кабелей

Данный критерий обусловлен требованиями эргономики наноспутника и обеспечением удобства сборки.

Межстековое пространство в наноспутниках часто ограничено и прокладка большого количества кабелей через него затруднительно. В зависимости от конструкции конкретного наноспутника можно выделить некоторое максимально рекомендованное количество кабелей, прокладка которых не вызовет существенных затруднений и теоритически максимальное количество кабелей которое возможно вместить в имеющееся пространство. Таким образом, данный критерий будет иметь следующий вид:

$$\min(M), M = \begin{cases} 0, & \text{при } N \leq N_p \\ N - N_p, & \text{при } \Delta \geq N - N_p \\ \infty, & \text{при } N \geq N_p + \Delta \end{cases}$$

где N – количество межстековых кабелей; N_p – максимально рекомендованное количество кабелей; Δ – допустимое превышение, M – коэффициент количества межстековых кабелей.

Считается, что если количество межстековых кабелей не превышает максимально рекомендованного, то считается что критерий $M = 0$, т.к. сборка такого наноспутника не вызовет затруднений. Также необ-

ходимо отметить, что в данном критерии принято существенное допущение, а именно используются не конкретные размеры кабелей, а используется их количество. Действительно, прокладка БКС через узкие пространства зависит не от количества кабелей, а от их поперечного сечения и гибкости, однако, как показывает практика, большинство кабелей в наноспутниках представляют собой либо гибкие шлейфы на 4–12 жил и коаксиальные кабели диаметром не более 5 мм, при этом площадь кабельных отверстия многократно превышает суммарную площадь всех проходящих через него кабелей. Поэтому достижение $M = \infty$ невозможно, и для упрощения алгоритма допустимо работать с количеством кабелей.

Критерий максимизации конструктивного параметра

Описанный ниже конструктивный параметр характеризует параметры работы системы управления движением. Очевидно, что система управления движением должна удовлетворять минимальным требованиям, но при этом чем лучше её характеристики работы при

Таблица 1

Бортовые системы и блоки наноспутника SamSat-QB50

№	Наименование бортовой системы		Масса, г
1.	БЦВМ		77.4
2.	СЭП		216.6
3.	Приёмопередатчик		76.4
4.	Антенна		70.0
5.	FIREX		152.8
6.	FIB		102
7.	Навигационный приёмник	Приёмник	29.8
		Блок интеграции	50.8
8.	Отладочная панель		40.6
9.	IGIS		40.3
10.	Плата пережигания		31.8
11.	Панель БС		26.4–58.6
12.	Аэродинамический стабилизатор		129.6
13.	Корпус+крепёж		358.6
14.	БКС		≈100
15.	Доп. масса		≈150

прочих равных условиях, тем более оптимальной является компоновка наноспутника. Так как конструктивный параметр необходимо максимизировать, а описанные выше критерии оптимальности минимизировать критерий максимизации конструктивного параметра будет иметь вид:

$$\min(N_{\text{пр}}), N_{\text{пр}} = \begin{cases} 1/k, & k \geq k_d \\ \infty, & k < k_d \end{cases}$$

где $N_{\text{пр}}$ – критерий максимизации конструктивного параметра, k – конструктивный параметр, k_d – минимально допустимый конструктивный параметр.

Интегральный критерий оптимальности БКС. Таким образом интегральный критерий оптимизации с учётом весовых коэффициентов K_L , K_M , и K_N для ранних стадий разработки запишется в следующем виде:

$$K = K_L \cdot L + K_M \cdot M + K_N \cdot N_{\text{пр}}$$

Нахождение оптимальной компоновочной схемы разделяется на несколько независимых подзадач, а

именно на задачу поиска возможных топологий БКС, задачу поиска компоновочных схем, удовлетворяющих условию обеспечения аэродинамической стабилизации, и задачу выбора из множества компоновок и топологий оптимальной.

Поиск возможных компоновочных схем

Конструкция, бортовые систем и общий дизайн наноспутника SamSat-QB50 разрабатывались в достаточной степени осесимметричными. Поэтому наноспутник можно считать осесимметричным, а смещением центра масс относительно продольной оси можно пренебречь. Таким образом, предлагается использовать описанный конструктивный параметр k [1,3]. Значение конструктивного параметра k должно быть не менее $6 \text{ м}^3/\text{кг}$. Для выбора возможных компоновок в таблице 1 приведены массы бортовых систем и блоков наноспутника SamSat-QB50. В качестве первого приближения БКС распределена равномерно внутри наноспутника и имеет массу 100 г. Так же предполагалось размещение дополнительной массы в носовой части

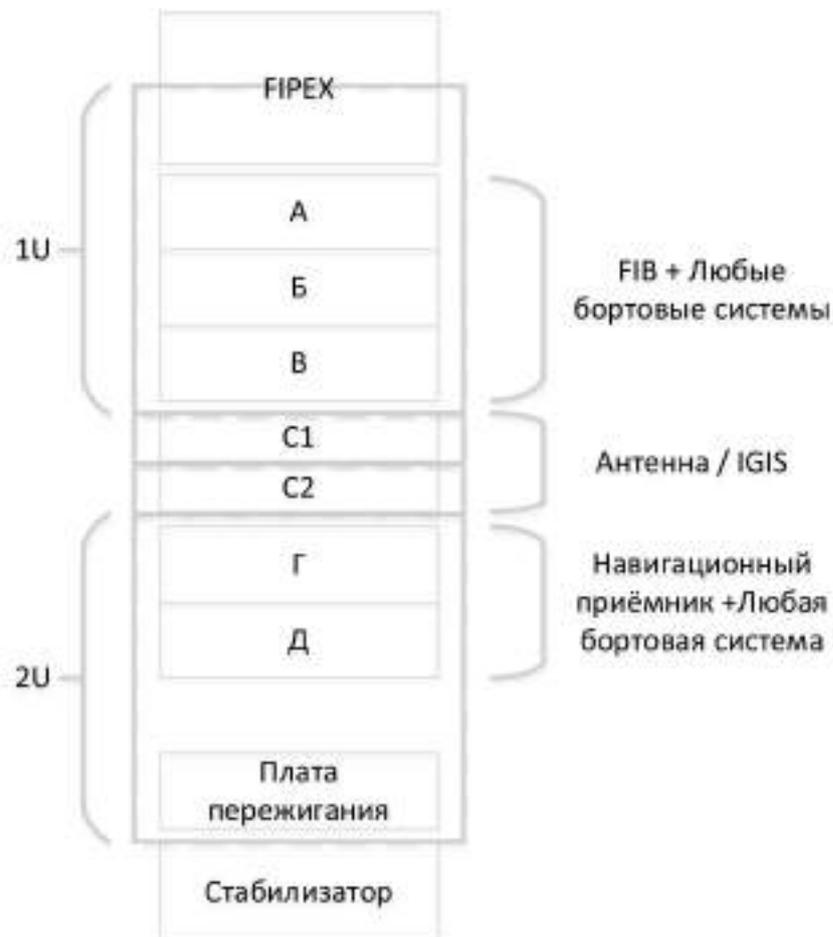


Рис. 2. Матрица заполнения наноспутника SamSat-QB50

наноспутника массой порядка 150 г, при условии не превышения суммарной массы наноспутника.

Расположение некоторых бортовых систем заранее определено конструкцией наноспутника. Матрица заполнения для наноспутника SamSat-QB50 приведена на рис. 2. Панели БС и отладочная панель устанавливаются на боковых гранях. Плата FIB предназначена для интеграции полезной нагрузки FIREX с бортовыми системами наноспутника и должна быть установлена в одном блоке с ней. Аэродинамический стабилизатор вместе с его системой пережигания устанавливаются на донной части наноспутника. Между стеками в позиции С1 и С2 устанавливаются приёмопередающая антенна и механизм зачековки IGIS. Навигационный приёмник должен располагаться во втором стеке из-за необходимости переброса центральной шины РС104 между стеками. Остальные бортовые системы могут быть установлены на произвольные места. Данная задача имеет 72 возможных решения.

Расчёты показали, что требуемому значению конструктивного параметра удовлетворяют следующие варианты компоновок (позиции С1 и С2 исключены, т.к. их перестановка существенно не влияет на конструктивный параметр; условные обозначения согласно таблице 1 и рисунку 2).

Поиск возможных топологий БКС

Удобно рассматривать топологию БКС в качестве неориентированного графа [4] с выделением подграфов

электропитания и различных интерфейсов обмена. На рис. 3–7 приведены графы всех бортовых систем наноспутника SamSat-QB50. Декомпозиция производится до уровня разъёмов, информационных интерфейсов, напряжений питания и микроконтроллеров.

Далее производится объединение всех бортовых систем в один граф. Очевидно, что добавление новых связей в полученный граф возможны только между вершинами описывающие разъёмы. Если рассматривать задачу поиска топологий БКС «в лоб», то задача имеет более 2^{3422} возможных комбинаций подключений бортовых систем. Поэтому принят ряд допущений и условий, позволяющих существенно ограничить размер выборки. В таблице 3 приведены эти условия и количественное сокращение объёма предварительной выборки после последовательного применения всех условий.

Дополнительно были введены группы разъёмов, для того чтобы сразу оптимизировать перебор. Так например, все разъёмы типа РС104 объединены в одну группу, которая разбита на две подгруппы РС104 male и РС104 female. Оставшиеся после предварительного отсева варианты топологий БКС подвергаются проверке на обеспечение напряжением питания всех бортовых систем.

Дополнительно объем выборки возможных топологий БКС позволяют сократить исходные данные подключения внутренней шины РС104, полученные исходя из условия обеспечения требуемого запаса статической устойчивости. Разъёмы РС104 соединяются друг

Таблица 2

Возможные варианты компоновок наноспутника SamSat-QB50

Вариант / Положение	I	II	III	IV
А	2	6	2	6
Б	6	2	6	2
В	1	1	3	3
Г	7	7	7	7
Д	3	3	1	1
Δx	52,67	51,26	53,77	52,64
k	6,143	6,156	6,325	6,274

Δx – запас статической устойчивости (смещение центра масс относительно центра давления);
 k – конструктивный параметр.

Формирование выборки возможных топологий БКС

№	Условие	Остаточный объём выборки
0	Изначальный объём при полностью хаотичном подключении	$>2^{1422}$
1	Бортовая система не может иметь соединений с самой собой	$>2^{1535}$
2	Каждый разъём может быть подключен не более чем к одному другому	$>2,5 \cdot 10^{22}$
3	Разъёмы могут быть подключены друг к другу, только если имеют соединение хотя бы одной однотипной вершиной	$>4 \cdot 10^{20}$
4	Подключаться друг к другу могут только разъёмы одной группы	$\approx 1,5 \cdot 10^{24}$
5	Исходные данные по компоновке	$\approx 6 \cdot 10^{18}$
6	Исключение панелей солнечных батарей	$\approx 15,5 \cdot 10^0$
7	Проверка наличия питания на бортовых системах	2520
8	Проверка наличия информационных связей	6

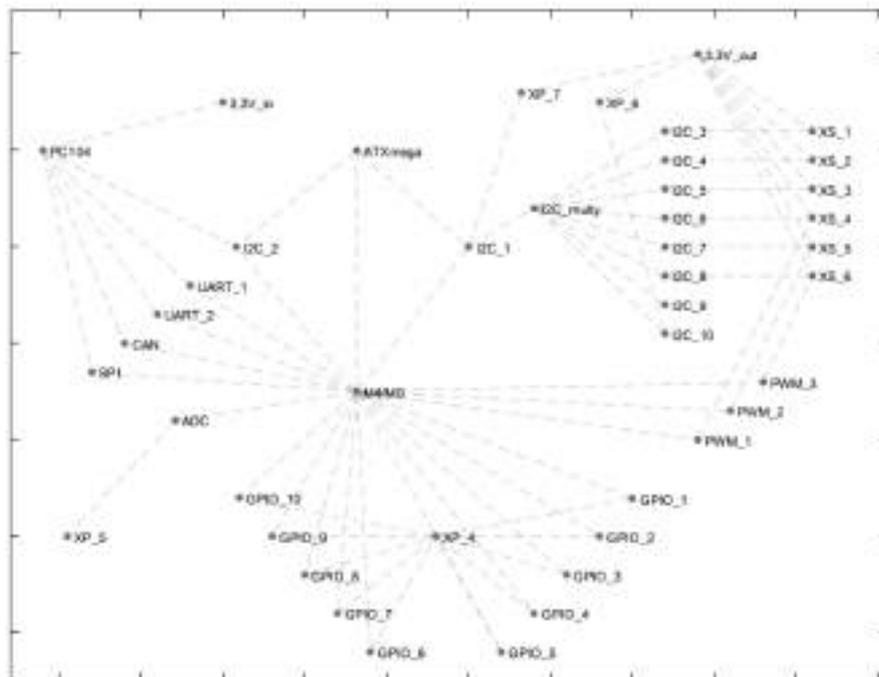


Рис. 3. Граф БЦВМ СГАУ, где M4/M0 – микроконтроллер LPC430; ATXмега – микроконтроллер ATXмега 128; интерфейсы I2C микроконтроллеров и мультиплексора; I2C_multy – мультиплексор I2C; PWM_1...3 – выходы ШИМ контроллера; PC104 – главный внешний разъём; XP..XS..P.. – внешние разъёмы; ADC – 8 канальный АЦП; UART_1, UART_2, CAN, SPI, I2C_1 ...10 – внешние интерфейсы; GPIO_1...10 – входы/выходы общего назначения; 3.3V_in и 3.3V_out – входы и выходы питания соответственно

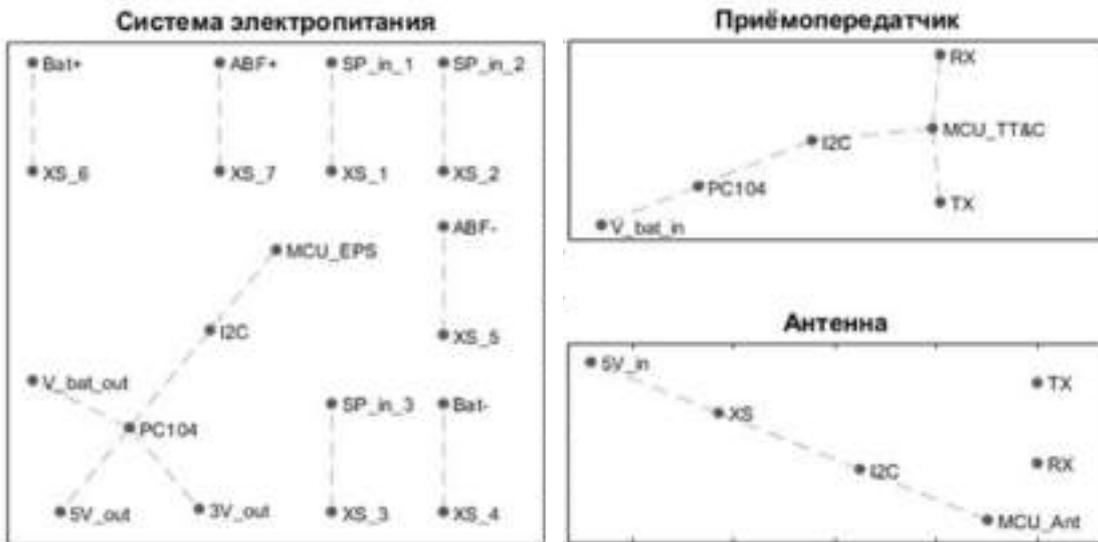


Рис. 4. Граф системы электропитания и системы связи, где обозначения аналогичны рисункам выше; MCU_EPS, MCU_TT&C и MCU_Ant – микроконтроллер соответствующих бортовых систем; RX и TX – высокочастотные входы и выходы соответственно; SP_in – входные напряжения с панелей солнечных батарей; Bat+ и Bat- – «плюс» и «минус» АКБ; ABF+ и ABF- – механизмы зачеховки «плюса» и «минуса» АКБ

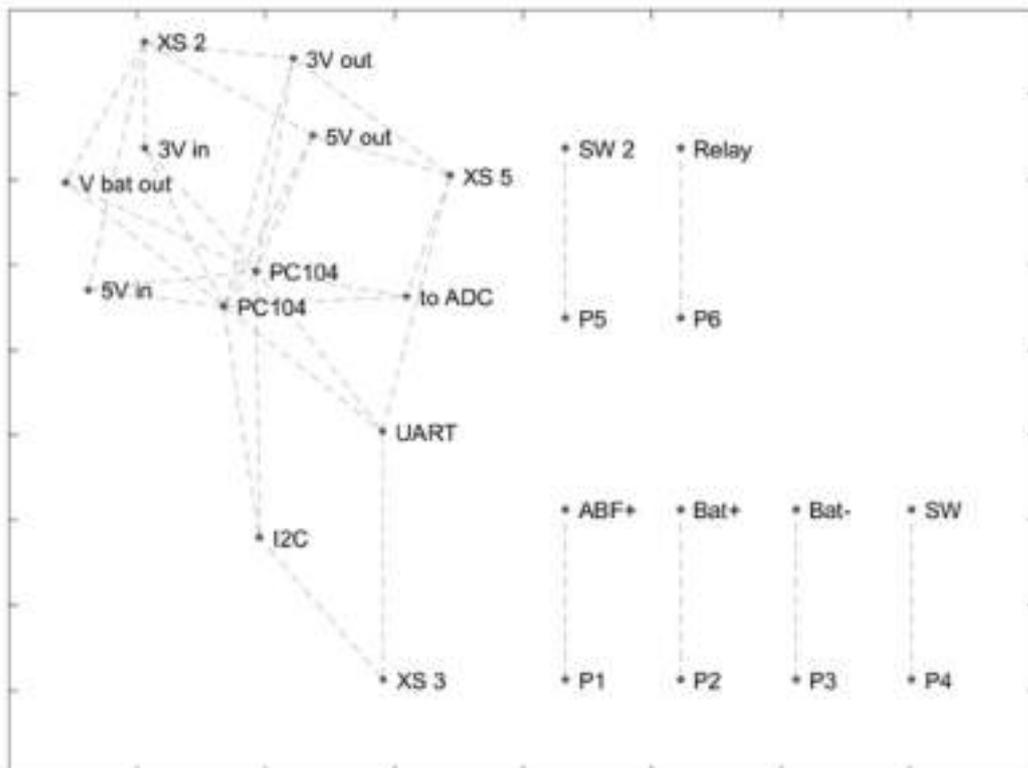


Рис. 5. Граф блока интеграции полезной нагрузки (FIB), где обозначения аналогичны рисункам выше; to_ADC – выход для подключения к АЦП, SW.. – входы для подключения контактов отделения (КО), Relay – выход реле (часть механизма зачеховки «минуса» АКБ)

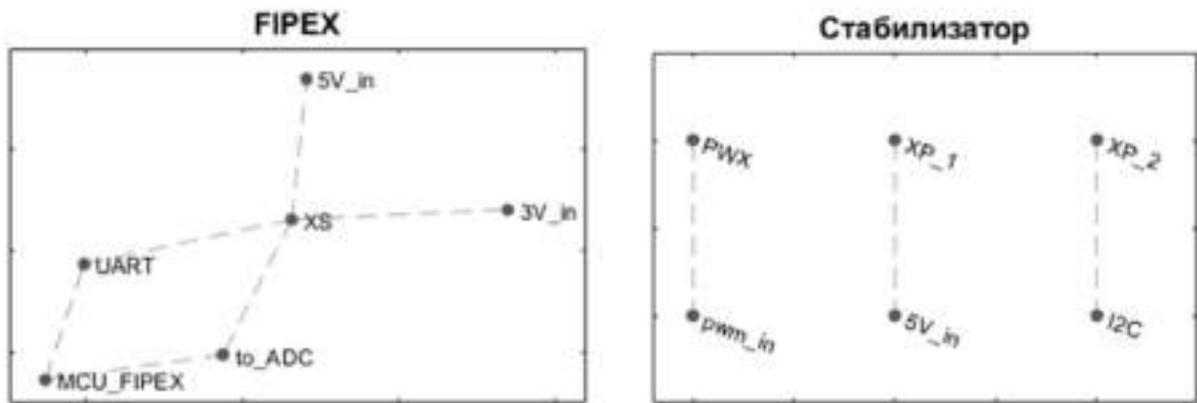


Рис. 6. Граф ПН FIPEX и блока электроники аэродинамического стабилизатора, где обозначения аналогичны рисункам выше; PWX – разъём для подключения к генератору ШИМ

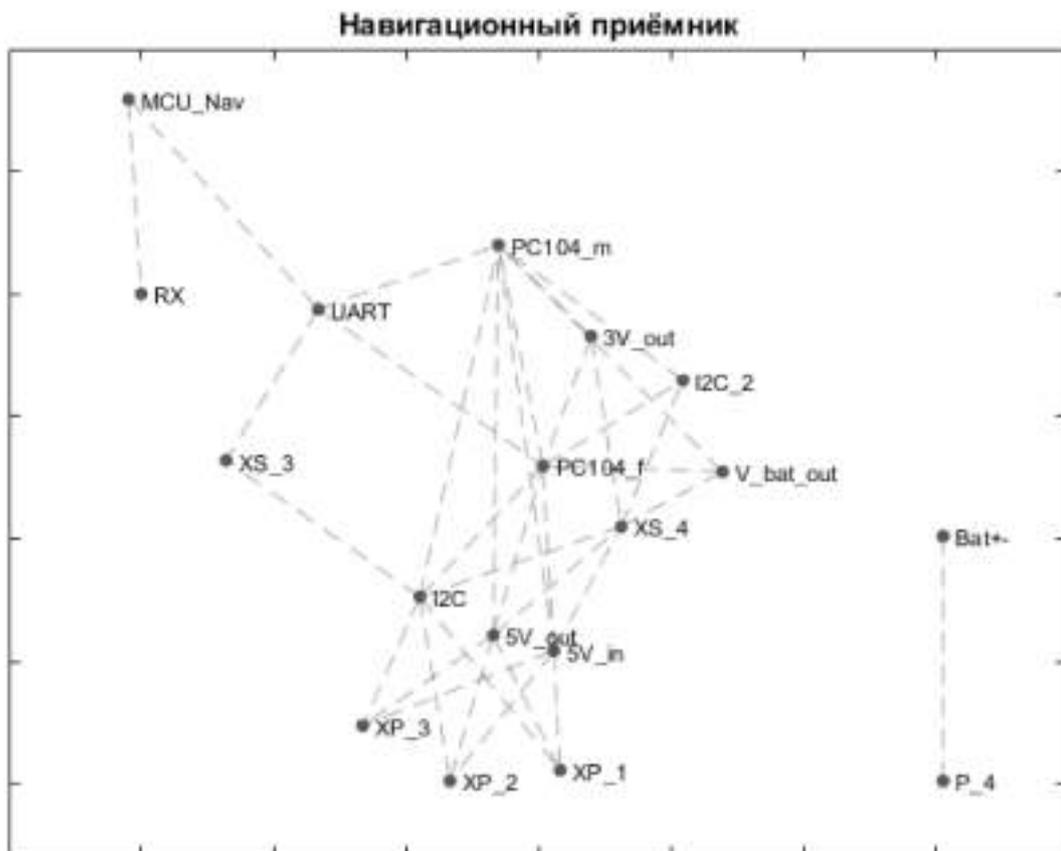


Рис. 7. Граф навигационного приёмника, где обозначения аналогичны рисункам выше.

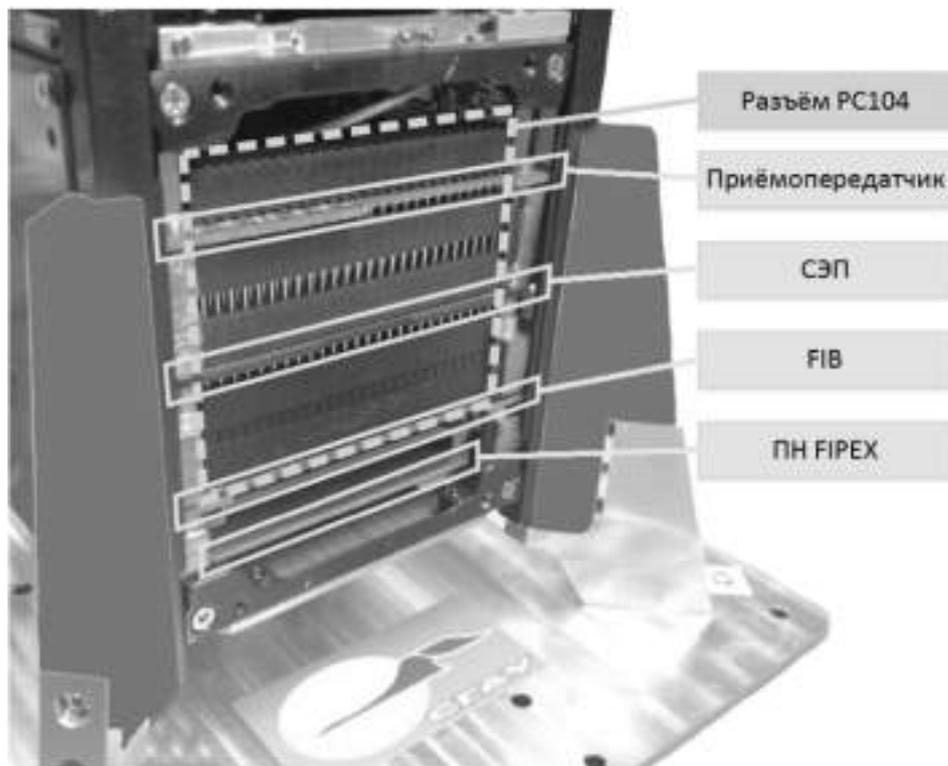


Рис. 8. Соединение бортовых систем через разъём PC104

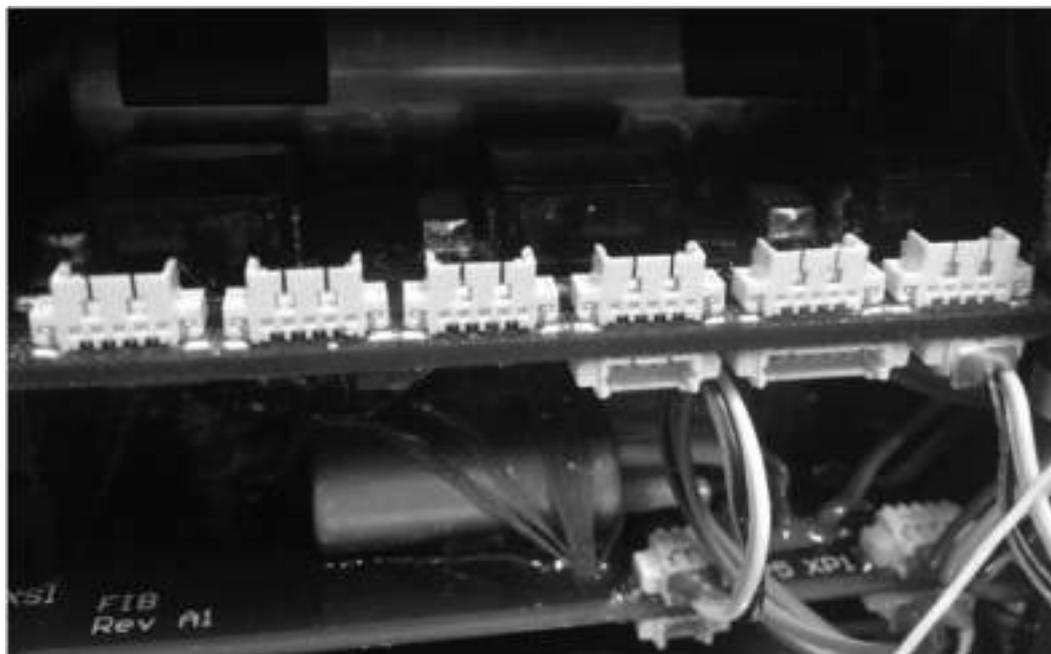


Рис. 9. Разъёмы подключения панелей BC к СЭП

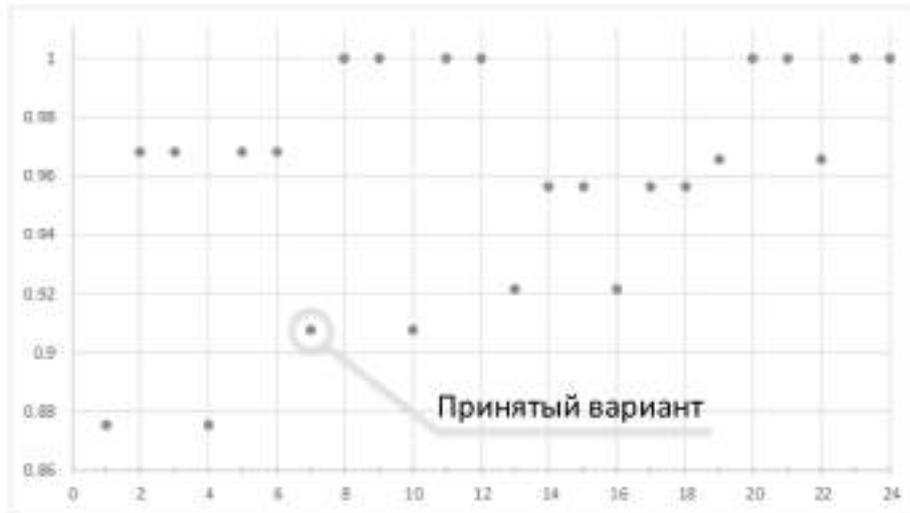


Рис. 10. Разброс нормализованных оптимизационных критериев

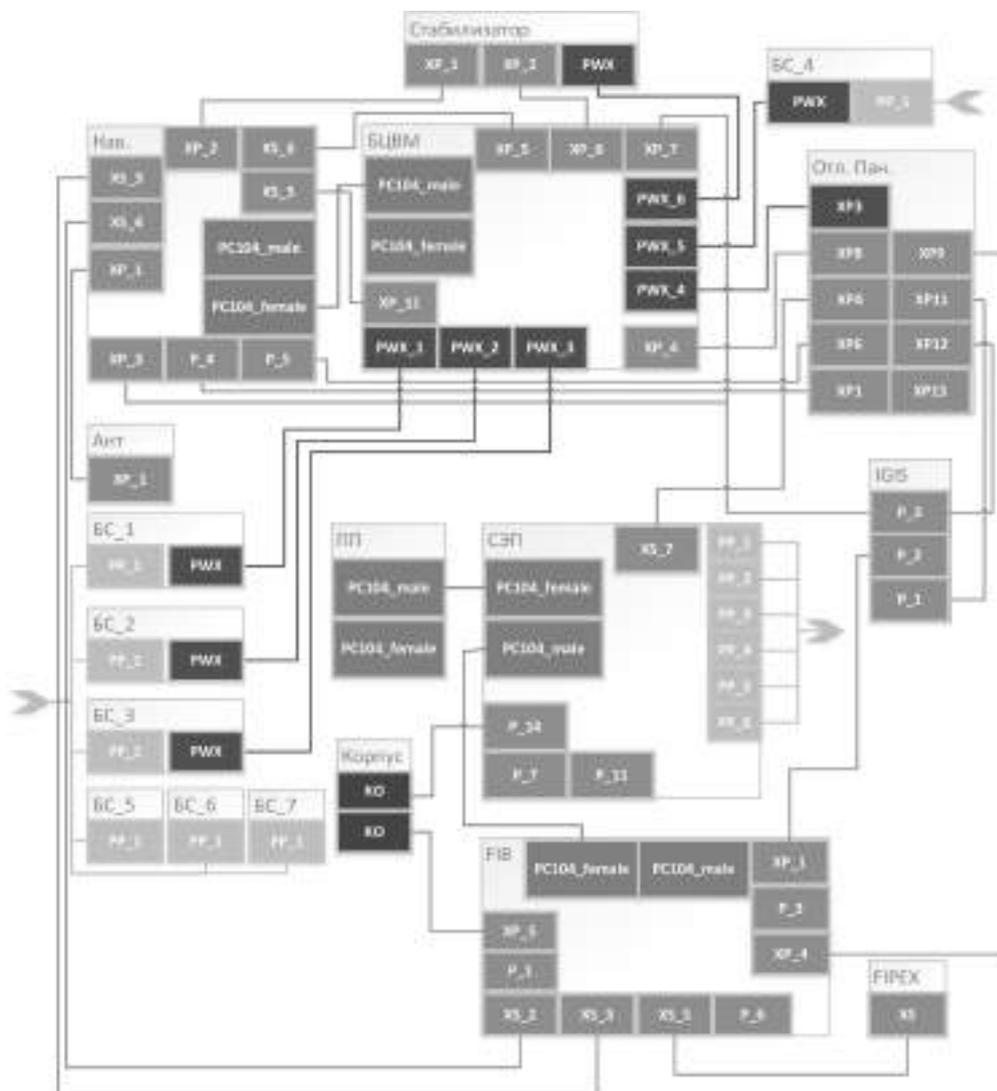


Рис. 11. Схема соединения наноспутника SamSat-QB50

с другом не шлейфом или кабелем, а непосредственно конструктивом самого разъёма, как показано на рис. 8, что обуславливается именно компоновкой наноспутника. Такой набор исходных данных дополнительно сокращает объём выборки до $6 \cdot 10^{18}$. Очевидно, что объём исходных данных не ограничивается лишь одним типом разъёмов. Кроме того, целесообразно временно исключить подключение панелей солнечных батарей, потому что каждая панель может быть установлена на любую из граней наноспутника, и поэтому удобнее расположить их оптимально уже относительно оптимальной внутренней компоновки [5–7]. Группа из 6 разъёмов для подключения панелей БС показана на рис. 9. Такое допущение позволяет дополнительно уменьшает выборку до приемлемых $15,5 \cdot 10^6$.

Каждая из возможных топологий БКС проверяется на наличие требуемых номиналов питания на всех бортовых системах. После данной проверки выделяется множество потенциально работоспособных топологий БКС, которое составляет 2520 шт. Проверка наличия требуемых номиналов питания производится по подграфу питания, включающего в себя только разъёмы и блоки входов и выходов питания.

На следующем этапе производится отсев по признаку наличия всех требуемых информационных связей, т.е. наличие связи между микроконтроллерами и датчиками. При проверке информационных связей учитывался конкретный тип интерфейса и его функциональные ограничения. Таким образом, поиск оптимального осуществлялся по выборке из 6 вариантов топологий БКС.

Анализ вариантов сборки

Таким образом, объединяя множество возможных компоновок и множество возможных топологий, получаем 24 варианта сборки наноспутника. Анализ полученных вариантов компоновок наноспутника по описанному выше критерию показал следующий разброс значений интегрального оптимизационного критерия оптимизации нормированный относительно максимального значения (рис. 10).

Как видно из рис. 10, для всех полученных вариантов топологий БКС значения критериев оптимальности очень близки. Идентичность некоторых значений критериев оптимальности объясняется моделью расчёта длины БКС, которая не учитывает конкретного положения разъёма на плате. В процессе сборки наноспутника был принят вариант № 5 (а именно компоновка № IV, схема БКС согласно рис. 11).

Литература

1. Пат. 024763 ЕАПО, МПК В64G 1/10, 1/24, 1/38. Способ аэродинамической стабилизации наноспутника класса CubeSat и устройство для его реализации (варианты) / И.В. Белоконов, И.А. Тимбай, Е.В. Устюгов ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокос-

мический университет имени академика С. П. Королева». – № 201400132 ; заявл. 09.01.2014 ; опубл. 31.10.2016, Бюл. № 10.

2. Кочев, Ю. В. Оптимизация массовых характеристик кабельной сети космического аппарата с использованием разработанной системы автоматизированного проектирования «АКАБ» / Ю.В. Кочев, С.В. Ефремов, А.В. Овчинников // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2013. – № 6 (52). – С. 121–125.

3. Белоконов, И. В. Выбор проектных параметров аэродинамически стабилизированного наноспутника / И.В. Белоконов, И.А. Тимбай // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 450–458.

4. Агафонов, Д. В. Метод оптимизации монтажа бортовой кабельной сети на изделиях ракетно-космической техники / Д.В. Агафонов, Ю.А. Воробьёв, Ю.В. Осокин // Космонавтика и Ракетостроение. – 2013. – № 1 (70). – С. 88–94.

5. Проектирование системы электропитания наноспутников семейства SamSat / Д.Д. Давыдов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 459–465.

6. Пестов, А. Б. Возможность снижения массы бортовой кабельной сети космических аппаратов связи при монтажных, сборочных работах / А.Б. Пестов, К.М. Двирная, В.Н. Наговицин // Решетнёвские чтения. Издательство: Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск). – 2015. – Т. 1, № 19. – С. 38–39.

7. Организация автоматизированного проектирования и электрического контроля бортовой кабельной сети космического аппарата в АО «ИСС» / А.М. Бутин [и др.] // Научно-ёмкие технологии. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 14–16.

ФИЛОСОФИЯ ИНФОРМАЦИИ

- Информация, энергия, материя
- Информационно-энергетическое поле
- Информационные аспекты культуры, нравственности и духовности
- Новое миропонимание

раздел

а з д е л

ФИЛОСОФИЯ

Информация и реальность

Information and Reality

Присяжнюк / Prisyazhnyuk S.

Сергей Прокофьевич

(office@itain.spb.ru)

доктор технических наук, профессор,

заслуженный деятель науки РФ,

действительный член Академии инженерных наук

им. А. М. Прохорова.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный

исследовательский университет информационных

технологий, механики и оптики»,

заведующий кафедрой ГИС.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: информация – information; мироздание – universe; реальность – reality; информационная картина Мира – the World's information picture.

Человечество на протяжении всего существования стремилось осознать, что такое информация: «Гермес. Творец сотворил весь этот мир, не руками, но Словом» [1]. Ещё в античное время информацией (лат. Information) называли разъяснение, изложение, истолкование. Так понимали слово «информация» в общей литературе ещё и в 60-х годах прошлого столетия [2]. В словаре русского языка С. И. Ожегова, вышедшего в 1961 г., слово «информация» истолковывалось как «сообщения, осведомляющие о положении дел, о состоянии чего-нибудь».

С развитием средств связи и электронно-вычислительных машин потоки информации приняли колоссальные размеры. Остро встал вопрос, что же такое информация, какова её природа и сущность.

Стала развиваться теория информации в основном направленная на измерения количества информации и её применение в бурно развивающихся инфокоммуникационных системах.

Большой вклад в понимание информации в этот период внесли: Х. Найквист, Р. Хартли, Н. Винер, А. Колмогоров, особенно К. Шеннон – основоположник статистической теории передачи информации.

Дальнейшее осмысление понятия количественной меры информации привело к пониманию того, что информация существует там, где имеется разнообразие, т.е. информация – это отраженное разнообразие, информация существует там, где имеется разнообразие, различие.

Основоположником концепции разнообразия является нейрофизиолог У. Эшби.

Характеризуя в целом теорию информации этого периода, следует отметить, что в ней отсутствует человеческий аспект в информационных процессах, т.е. содержание и ценность её для получателя.

В наступивший информационный век тема информации приобрела основополагающее значение, от которого зависит само существование человечества.

Одним из важнейших аспектов современного мировоззрения стала информационная картина Мира и её влияние на человека. Информация представляется как универсальное свойство физических объектов, явлений, процессов, заключающихся в способности воспринимать внутреннее состояние объектов физической реальности и внешние воздействия, преобразовывать полученные сведения и передавать результаты другим объектам, явлениям, процессам [3–7].

В таком видении информация представляется процессом, протекающим во времени в материи и является её внутренним содержанием. Это значит, что исходно непрерывная субстанция – энергия превращается в частицы путём взаимодействия с ненаблюдаемой дискретной информацией, которая квантует энергию, формируя дискретное множество энергоинформационных квантов частиц.

В данном смысле информация составляет организирующую (творящую) составляющую мироздания. Так как время характеризуется интервалами между событиями, то информацию можно представить в виде волны плотности времени, распространяющейся в пространстве.

Для переноса волны плотности времени необходима энергия, которая должна быть постоянной (неисчерпаемой). Информация при такой картине Мира является преобразователем энергии из потенциальной в кинетическую, создающей мироздание с физическими и информационными законами бытия.

И тогда становится очевидным, что информация и энергия являются первичными в мироздании и формируют её содержание.

Процесс возникновения информации в мироздании предполагает наличие внешнего Фактора, существующего вне времени, который с волной плотности времени присутствует во всем мироздании, являясь его фокусом.

Информация от фокуса распространяется волной мгновенно. Проходя через материю от элемента к элементу, волна плотности времени уплотняется, создавая множество новых фокусов внутри материи. Волны от внутренних фокусов, проходя через материю, достигают Фокуса Внешнего Фактора. Таким образом, в каждой точке мироздания, как в голограмме, присутствует вся информация о мироздании. При таком информационном устройстве мироздания каждый физический элемент мироздания подчиняется единым физическим и информационным законам.

В результате уплотнения волны плотности времени в фокусах возникает сознание у физических элементов реальности от микро до макроэлементов. В этом смысле человек есть информация. Информация есть сущность человека. Информация неотделима от энергии. Человек, формируя цель своих устремлений, определяет объем потенциальной энергии необходимой для её реализации.

В процессе реализации своего устремления непрерывная потенциальная энергия, превращаясь в дискретную кинетическую, под воздействием информации и творит мироздание.

И в этом смысле человек является сотворцом Творца, представляющего собой Святую Троицу, о чем говорит данное нам Святое Писание.

Информация, переносимая энергией в волне плотности времени, исходящей от вневременного Творца, из центрального фокуса мироздания присутствует в человеке и содержит все информационные законы, проявляющиеся в виде совести человека. Совесть – это универсальное чувство, интегрирующее объективное самопонимание и ответственное отношение к миру человека, сознающего непреложность космических законов; бескомпромиссное личное стремление к поддержанию гармонии во всех возможных информационно-энергетических процессах [9].

Информация, поступающая от внутренних объектов мироздания (информационных фокусов) в виде волн плотности времени и преобразованная внутри человека, представляет его информационную сущность, и если она согласована с исходной чистой информацией (с совестью), то человек в гармонии с законами мироздания.

Известна пословица (народная мудрость) «человек предполагает, а Бог располагает». Всё, что придумает человек, если согласуется с Его Волей, процветает, а всё, что не согласуется, то распадается как Вавилонская башня.

Бог хочет, чтобы люди спаслись и пришли к познанию истины. Истину раскрывает нам Господь в Святом Писании и в познании законов Природы.

Поэтому познание главного вопроса современности: «Как устроена Вселенная?» напрямую влияет на будущее каждого человека и человечества в целом.

Литература

1. Гермес Трисмагист и герметическая традиция Востока и Запада / перевод К. Богуцкого. М., 1998. – 622 с.
2. Кондаков, П. И. Логический словарь – справочник / П.И. Кондаков. – М.: Наука, 1975 – 717 с.
3. Присяжнюк, С. П. Информация – как третья составляющая мироздания / С.П. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2015. – № 3. – С. 176–178.
4. Присяжнюк, С. П. Информация и духовная безопасность / С.П. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2002. – № 1–2. – С. 4–5.
5. Копейкин, К. В. Что есть реальность? Размышления над произведениями Эрвина Шрёдингера / К.В. Копейкин. – СПб: изд-во СПбГУ, 2014. – 135 с.
6. Полонников, Р. И. Феномен информации и информационного взаимодействия / Р.И. Полонников. – СПб: изд-во СПИИРАН, 2001. – 189 с.
7. Афанасьев, Н. Ф. О диалектическом единстве духовного и материалистического методов познания / Н.Ф. Афанасьев // Информация и Космос. – 2002. – № 1–2. – С. 6–10.
8. Присяжнюк, С. П. Феномен информации. С позиции религии и науки раскрывается сущность информации и ее роль в мироздании / С.П. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2013. – № 1. – С. 11–12.
9. Кравченко, В. В. Симфония человеческой культуры / В.В. Кравченко. – М.: Аграф, 2017. – 384 с.

Космические основы понимания «Природы» в ее взаимоотношениях с «Культурой»

The Cosmic basis of the "Nature" understanding in its relationship with "Culture"

Кравченко / Kravchenko V.

Виктория Владимировна

(vickra@mail.ru)

доктор философских наук, профессор.

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет),

профессор кафедры теории и практики перевода.

г. Москва

Ключевые слова: природа – nature; культура – culture; космос – cosmos; признаки космоса – cosmos indications; иерархия космосов – cosmos hierarchy; критерии различения космосов – criteria for cosmoses distinction; русские космисты – the Russian Cosmists; В.И. Вернадский – Vladimir Vernadsky; К.Э. Циолковский – Konstantin Tsiolkovsky; А.Л. Чижевский – Alexander Chizhevsky; Р.Коллин – Rodney Collin; “Природно- Культурный космос” – “Natural-Cultural cosmos”.

Статья посвящена рассмотрению философского понятия «Природы» на базе теоретико-научного наследия русских космистов (В. И. Вернадского, К. Э. Циолковского, А. Л. Чижевского) и Р. Коллина, современного последователя русских духовных учителей. Приведены признаки «космоса» по Р. Коллину, на основе которых Природа рассматривается не только как особая целостность, но и как подсистема планеты Земля, как особого «космоса», органично встроенного в иерархию высших «космосов» – Солнечной системы, Галактики Млечный путь и Вселенной. Для различения и сопоставления космосов разных уровней в статье предлагается ряд критериев: пространственных ограничений, познаваемости, освоенности (возможности человеческой деятельности) и разумности. Предложены некоторые версии постановки проблемы глобальных соотношений Культуры и Природы. Выдвигается концепция существования особого «Природно-Культурного космоса», имеющего непосредственное отношение ко всей иерархии космосов мироздания.

The article is devoted to the philosophical concept of the "Nature" on the basis of the theoretical and scientific heritage of Russian cosmists (Vladimir Vernadsky, Konstantin Tsiolkovsky, Alexander Chizhevsky), and Rodney Collin, a contemporary follower of the Russian spiritual teachers. The signs of "cosmos" according to R. Collin have been given, on the basis of which Nature is viewed not only as a special integrity, but also as a subsystem of the planet Earth, as a special "cosmos" organically built into the higher cosmoses hierarchy – the Solar system, the Milky Way Galaxy, and the Universe. To distinguish and compare the cosmoses of different levels, the article proposes a number of criteria as follows: spacial limitations, cognoscibility, opening up or developing (possibilities of human activity), and reasonableness. Some versions of the global relations of the Nature and Culture have been proposed. The concept of a specific "Natural-Cultural Cosmos" existence, which has a direct relation to the entire cosmoses hierarchies of the universe, is being put forward.

*Два мира есть у человека:
Один, который нас творил,
Другой, который мы от века
Творим по мере наших сил.*

Н. Заболоцкий.

Резкие изменения климата, участившиеся природные катастрофы (наводнения, землетрясения, извержения вулканов, ураганы и прочее), необычное поведение животных (выбросы китов на сушу, массовое падение птиц) и целый ряд других необъяснимых явлений вынуждают человечество пересмотреть свое отно-

шение к понятию «Природа», для того чтобы скорректировать реальную стратегию выживания в новых непредсказуемых условиях.

Понятие «Природа» в современном мировоззрении фактически отождествляется с понятием «окружающая среда» и связано, в первую очередь, с естественно-научными представлениями о развитии и строении планеты Земля. В настоящее время в среде ученых-естественников продолжается бурная дискуссия (начатая более 30 лет назад) об антропогенной эре, то есть особом этапе истории Земли, когда появился человек. Оспариваются как различные сроки появ-

ления самого человека, так и проблема его влияния на окружающий мир: насколько оно значительно и даже является ли определяющим для состояния и развития планеты Земля. Большинство геологов и географов считают, что голоцен (начавшийся примерно 10 000 лет тому назад как второй отдел четвертичного периода кайнозойской эры) продолжается и никаких оснований для объявления наступления новой эры нет. Но многие экологи и антропологи убеждены в том, что необходимо специально рассматривать антропоген, то есть тот период, когда не просто появился человек, а когда он стал оказывать определяющее влияние на окружающую среду, и «Природа», которую раньше противопоставляли «Культуре» и «Обществу», в настоящий момент кардинально зависит от деятельности человека.

Однако понимание термина «Природа» оказывается не столь однозначным и простым, как может показаться всем тем, кто это понятие употребляет.

Необходимо напомнить, что Аристотель впервые придал греческому слову «*physis*» (который традиционно переводится как «природа») философский смысл: в его концепции этот термин имеет отношение к движению, росту, изменению. Так, «физис» = «природа» желудя заключается в том, чтобы вырасти в дуб. «Природа» вещи, по Аристотелю, есть ее цель («телос»), то, ради чего она существует. Животные, растения и элементы существуют от природы, то есть у них есть внутренний принцип движения (перемещения и изменения качества и размера). Природа связана с источником движения или покоя, она проявляется в форме, а не в материи. Вещь в большей степени становится самой собой, когда достигает полного осуществления (желудь, как дуб в потенции, природен в силу своего развития). По Аристотелю, те вещи «естественны» = «природны», которые, «...двигаясь непрерывно под воздействием какого-то начала в них самих, доходят до известной цели» [1].

Понятно, что у Аристотеля его учение о «форме» и «природе» вещей вытекало из его метафизического мировоззрения, из утверждения о неизменности мира. Стагирит разработал подробные учения о душе, о Боге и создал во всех смыслах этого слова метафизическую космологию.

Начатая Аристотелем тема в истории философии обсуждалась на протяжении двух с половиной тысячелетий. По мнению выдающегося современного историка философии Б. Рассела, концепция «природы» Аристотеля «...стала в конечном результате огромным препятствием для прогресса науки» [2]. Так, движение, как реализация того, что существует в потенции, несовместимо с относительностью перемещения (если А движется относительно В, то движется ли В относительно А?). В неживой природе (с точки зрения современной физики) любая концепция «цели» бессмысленна, поскольку никакое движение не может рассматриваться иначе, как относительное (по концепции А. Эйнштейна).

Современная наука полностью преодолела влияние Аристотеля, но рассмотрение «окружающей среды» только как объекта изучения и варварского использования явно ведет человечество к глобальной катастрофе. В противовес хищнической доктрине «царей и победителей» Природы чрезвычайно актуальным и спасительным для людей может стать переосмысление понятия «Природы» на основе истинно реалистической, научно-гуманистической и духовной философской традиции.

Мы обратим внимание на научно-философские концепции русских космистов: В. И. Вернадского, К. Э. Циолковского, А. Л. Чижевского. Понятие «Природы» они связывают не только с новейшими идеями в современных науках, но также (отвергая, конечно, аристотелевскую метафизику) представляют Природу как органическую целостность и видят в Природе внутренне присущий ей рост, движение и изменение. Отправным моментом в рассмотрении Природы они считали планету Земля, а человечество – неотъемлемой частью Природы.

У русских космистов понятие «Природы» тесно связано с космической иерархией: планета Земля, Солнечная система, Галактика и Вселенная. Эту взаимосвязь можно различать по нескольким критериям:

1. Пространственные ограничения:

С точки зрения В. И. Вернадского категорически различаются в пространственном строении: планета Земля, Солнечная система и наша галактика Млечный путь. Они являются различными «естественными телами».

Ученый писал: «Доступная точному научному изучению реальность резко для нас распадается на несколько пространственно ограниченных естественных тел. Таковы: 1) пространство нашей Галактики Млечного пути; 2) пространство нашей Солнечной системы, обособленное в Млечном пути; 3) пространства планет ее, обособленные в пространстве Солнечной системы и 4) пространство нашей планеты – Земли, неразрывно с ними связанное и наиболее глубоко нам доступное» [3].

Заметим, что для современных физиков и астрономов различие в подходах к рассмотрению дальней Вселенной и ближайшего к нам так называемого «космического пространства» привычно, скажем, с точки зрения различий между общей и специальной теорией относительности А. Эйнштейна.

Концепция В. И. Вернадского для нас важна тем, что он, наряду с различием между Вселенной и Солнечной системой, подчеркивал различие между Солнечной системой и земным пространством. Итак, с точки зрения физики и основ естествознания, мы можем изначально различать «пространственно ограниченные естественные тела»: Вселенную, которая начинается уже на уровне рассмотрения нашей спиральной галактики Млечный Путь и дальше в неизвестность; нашу Галактику; Солнечную систему, которая рассматри-

ваются нами одновременно и как часть пространства нашей Галактики, занимаемая нашей звездой Солнцем, и как пространства планет нашей солнечной системы; планету Земля, включая Природу, как часть пространства нашей планеты.

«Природа» – это то, что дано нам изначально, онтологически; то, что существовало, существует и будет существовать вне и помимо человечества, но частью чего оно в настоящий момент является. Под «Природой» в нашем исследовании мы понимаем часть окружающего нас материального мира, в которой мы непосредственно находимся; это то, что порождает (или возвращает) и непосредственно окружает род человеческий.

Планета Земля в своем полном объеме потенциально является нашей Природой. В реальности не вся биосфера и тем более не все косное вещество нашей планеты необходимы человечеству для жизни и выживания (по крайней мере, в пределах современных знаний). С точки зрения данного критерия пространственного ограничения мы условно примем гипотезу о том, что Природа и планета Земля являются тождественными.

Родни Коллин, один из оригинальных исследователей, примыкавший к духовной школе «Четвертого пути» русских учителей Г. И. Гурджиева и П. Д. Успенского, предложил рассматривать обозначенные «пространственные тела» как завершенные в себе целостности: планета Земля – Солнечная система [4] – Галактика Млечный путь – Вселенная. В своей книге «Теория небесных влияний» Р. Коллин, возрождая древнейшие философские традиции, рассматривал эти структурно организованные и упорядоченные целостности в качестве «космосов». Как известно, понятие «космос» происходит от греческого понятия «космос» – порядок, гармония, украшение, целое, внешний вид целого, гармонический порядок целого, вселенная в ее совершенстве [5]. Таким образом, в разграничении и сопоставлении этих «естественных тел» = «космосов» можно увидеть общее и различное.

Главные признаки любого космоса, по Р. Коллину:

1) порожденность высшей силой (в соответствии с особым замыслом); 2) наличие сознания и возможность разума; 3) возможность саморазвития или самопревосходства; 4) наличие собственного пространства и времени, имеющих особые измерения и неразрывно связанных между собой; 5) встроенность каждого космоса в единую иерархию космосов.

При этом время – это четвертое измерение данного космоса, являющееся, по существу, размерностью космоса следующего порядка. Кроме того, по Коллину: «Время создано вращением (данного космоса – В.К.) вокруг жизненного центра некоего большего мира» [6]. Так, длина человеческого тела для отдельной клетки, «обозревающей» только конкретное «поперечное сечение» целого тела в определенный момент, и «вращающейся» по кровотоку вокруг сердца, будет временем ее жизни.

Пространство космоса определяется заданными ему измерениями. Так, как заметил еще И. Кант, человеку врождено восприятие трех измерений, определяющих понимание им пространства. Коллин пишет о семи различных способах представления космоса, в соответствии с восприятием наблюдающего: точка (вне измерений); линия (одно измерение); плоскость (два измерения); тело (три измерения); время всей жизни (четыре измерения); вечное повторение жизни (пять измерений); абсолютное целое, как все существующее и реализация всех возможностей (шесть измерений) [7].

Исходя из вышесказанного, планета Земля = потенциальная Природа легко определяется в качестве материального космоса. Согласно признакам Р. Коллина: 1) она порождена высшей силой (видимо, Галактики и Вселенной, о чем писал еще К. Э. Циолковский [8]) в соответствии с неким общевселенским замыслом; 2) она обладает собственным сознанием и разумом (неважно, считать ли сознанием Природы совокупный разум всех живых существ или некое отдельное образование, именуемое в разных источниках по-разному, например «информационным полем»); 3) она постоянно развивается и «превосходит» саму себя; 4) у нее существуют собственные пространство и время, наконец, 5) Природа встроена во вселенскую иерархию космосов: как низший космос она взаимодействует с Солнечной системой, Галактикой и Вселенной. В то же время, она является высшим космосом для космосов биосферы, популяции, этносов, отдельных организмов, наконец, космоса живой клетки. Уже на этом уровне рассмотрения Природы совершенно очевидно, что биосфера, включающая и человека, далеко не исчерпывает все понятие Природы и является некой ее составной частью или подсистемой.

2. Критерий познаваемости

Природа – это среда существования человека, непосредственно открытая для бесконечного и кропотливого изучения. Основным и насущным объектом исследования была и остается планета Земля. С точки зрения критерия познаваемости совершенно очевидно, что нынешняя Природа далеко не тождественна космосу планеты Земля. Океанологи говорят о том, что для нас околоземное космическое пространство известно значительно больше, чем глубины Мирового океана. Человек только начал изучать литосферу, делает предположения о строении земного ядра, не изучил полностью целый континент Антарктиду, более того, не может прогнозировать процессы уже известных географических, геологических, биологических и околоземных астрономических объектов... Как можно соотносить современное понятие «Природы» и космос планеты Земля? Представляется, что Природа – это особая подсистема космоса планеты Земля, возможно, становящийся самостоятельным космосом. Проще всего Природой сегодня можно считать познанную часть планеты Земля.

Солнечная система – это часть обозримой Вселенной, многие законы которой человеком открыты. При этом

Солнечная система – та часть вселенского мироздания, в которой в принципе, в некоем обозримом будущем может осуществляться жизнь человека, как биологического и деятельного существа, вышедшего за пределы своей планеты. Часто именно Солнечная система современными людьми ассоциируется с древнегреческим понятием «космоса».

Соответственно, Галактика и Вселенная – это бесконечное и непознаваемое полностью (современными средствами) для человека мироздание.

Пределы познания постоянно сдвигаются. Потому с точки зрения критерия познаваемости, уже сегодня Природа для человека – это не только известные области планеты Земля и околоземное пространство, но также и осваиваемая сейчас часть Солнечной системы: наш спутник Луна, соседний Марс [9]; внимательно изучаемые спутники Юпитера; в последние годы активно исследуемый Титан, спутник Сатурна... Разработаны и осуществлены комплексные научные программы изучения всей Солнечной системы, не только крупных астрономических объектов, но и астероидов, комет, космической пыли...

Буквально на наших глазах меняются научные представления о строении Солнечной системы. Так, Плутон, считавшийся после его открытия в 1930 г. десятой планетой нашей Солнечной системы, в 2006 г. был лишен статуса планеты. Майк Браун, знаменитый астроном, «убивший» по его же выражению Плутон [10], при этом открыл еще одно астрономическое тело, Эриду, которая оказалась даже больше Плутона. Но и Эриду Браун не посчитал нужным признать планетой. В любом случае, Плутон и вновь открываемые астрономические тела, в особенности на «границе» нашей Солнечной системы, становятся объектами научного исследования. И по критерию познаваемости они постепенно по факту будут включаться в наше пространственное понимание «Природы», когда их будут исследовать все более пристально и тщательно.

Возможно, в обозримом будущем к нашей Солнечной системе будут отнесены прилегающие к ней облако Оорта, а в дальнейшем – ближайшие к нам небольшие галактики – Магеллановы Облака, Скульптор, Печь, – фактически, до пределов Туманности Андромеды. Понятно, что границы нашей Солнечной системы условны, как и ее структура.

Познание Вселенной также расширяется. Сегодня, благодаря орбитальным телескопам, мы можем обозревать невероятные глубины и дали просторов Вселенной, изучать ее в разнообразных волновых диапазонах. Но мы должны признать, что вся Вселенная на долгие тысячелетия (по К. Э. Циолковскому – на миллиарды миллиардов лет) для нас остается неохватной.

Познание астрономических и физических законов Природы и Солнечной системы сегодня тесно связано с развитием целого ряда других научных дисциплин. Огромный вклад в геологические, геохимические, минералогические, биологические и еще целый

ряд других исследований Земли сделал В. И. Вернадский. Казалось бы, его понятие о «биосфере», «сфере живого вещества» легче всего было бы ассоциировать с понятием «Природы». Но Вернадский убедительно доказал важность косной материи, а главное – рассматривал неразрывную взаимосвязь уровней биологической организации живого – от клетки до биосферы. И доказывал целостность нашего планетарного космоса как «естественного тела».

А. Л. Чижевский доказал, что познание Солнца дает человеку возможность прогнозировать и по-новому исследовать социальные процессы, подчиняющиеся солнечным ритмам [11]. Также он заложил основы «гелиобиологии», доказав влияние солнечной энергии на земные организмы, в частности, на функционирование нашей кровеносной системы и даже строение нашей крови.

К. Э. Циолковский занимал особую позицию в вопросе познаваемости окружающего нас космического пространства. Он был не согласен с релятивистской концепцией А. Эйнштейна, отрицал теорию расширяющейся Вселенной и ограниченность ее размеров... Многие идеи нашего великого соотечественника остаются до сих пор недооцененными современными исследователями. Для нашей работы важнейшим моментом деятельности К. Э. Циолковского является тот факт, что его теория ракетостроения была разработана как приложение к философским исследованиям. Представляется несомненным, что именно философские обобщения и теории позволяют современному человечеству открыть новые пути познания космоса Природы и космосов более высоких уровней.

3. Критерий освоенности (возможности человеческой деятельности)

Природа – это среда непосредственной деятельности человека здесь и сейчас. Понятие Природы, с точки зрения критерия деятельности, меняется на наших глазах. Сегодня это и наш спутник Луна, соседний Марс; в последние годы активно «натурализуемый» Титан, изучение которого носит не теоретический, а прямо практический характер [12]...

К. Э. Циолковский спроектировал первый космический аппарат для практического изучения и освоения Солнечной системы и Галактики. В разговорах с А. Л. Чижевским Циолковский описывал эры развития человечества на миллиарды лет вперед, фактически отождествляя понятие «развития» с представлением об «освоении» окружающего нас мироздания. По представлениям К. Э. Циолковского, в первую эру человечеству предстояло выйти за пределы Земли, как «колыбели разума». В наших терминах – Природа должна быть неизбежно расширена до размеров Солнечной системы. Затем, после освоения всех планет Солнечной системы, человечеству суждено освоить Галактику. Завершающая, терминальная эра, предполагала расселение человечества во всей Вселенной, превращение биологических тел в «лучистую энергию» и слияние

человеческого высокоразвитого разума с Вселенским Разумом. Таким образом, данные нами понятия Солнечной системы, Галактики и Вселенной в проектах Циолковского фактически сливались. [13] Однако учтем, что терминальная эра была намечена Циолковским сроком на миллиарды лет вперед. И к тому времени, можно не сомневаться, взгляды человечества и на себя, и на Солнечную систему, и на Галактику, и на Вселенную будут еще многократно пересмотрены.

Итак, с точки зрения критериев познаваемости и освоенности Природа – это среда непосредственной преобразующей деятельности человека. При такой постановке проблемы само понимание Природы соединяется с исходным пониманием человека, как творческого, деятельного существа. Для нас особенно важно то, что Природа, как часть мироздания, что породила (или взрастила) человечество, – дала ему определенные способности, возможности и средства для создания Культуры, как чего-то «внеприродного», не существовавшего без человеческого участия [14].

4. Критерий разумности

В. И. Вернадский считал, с одной стороны, что человечество в природе есть часть «биомассы», особая форма «живого вещества», но с другой – он резко выделял человечество по формам его жизнедеятельности из косной материи на основании данного человеку разума. Развивая мысль об «автотрофности» человека, Вернадский провидчески поднял проблему антропогенного влияния человека на среду обитания и неизбежное превращение биосферы в ноосферу (сферу Разума).

К. Э. Циолковский, признавая мощь человеческого разума и его роль в совершенствовании природы, указывал на наличие «разумных сил Вселенной», в направлении к которым человеческий разум неизбежно эволюционирует. И на завершающем этапе будущей эволюции человечества, через миллиарды лет, в «терминальную эру», разум человеческий соединится со вселенским.

Таким образом, необходимо подчеркнуть, что русские космисты понимали Природу не как данность, а как задание человечеству.

Рассматривая положение человека в Природе, можно развить мысль В. И. Вернадского о том, что человечество есть часть природной «биомассы», особая форма «живого вещества», при этом резко отделенного в формах своей жизнедеятельности от косной материи. Так, В. И. Вернадский писал: «В настоящее время мы можем с научной точки зрения рассматривать жизнь на нашей планете не иначе, как выражение единого явления, существующего без прерыва со времени самых древних геологических эпох, следы которых мы можем изучать. В течение всего этого времени живое вещество было резко отделено от косной материи. Человек неразрывно связан в одно целое с жизнью всех живых существ, существующих или когда-либо существовавших» [15].

Однако живые существа (включая и людей, как бы далеко им не хотелось оторваться от Природы) неиз-

бежно сохраняют тесную связь со средой обитания. По Вернадскому, живое вещество всегда остается связанным «с другим веществом биосферы только биогенной миграцией атомов» [16]. Нагляднее всего эта связь проявляется на похоронах, когда человек предается земле, становясь частью почвы. Правда, некоторые западные похоронные бюро предлагают особые услуги: прах родственников становится материалом для создания алмазов, или тела замораживаются криобионическим способом и хранятся в расчете на оживление в далеком будущем. Таким образом углерод умерших тел не возвращается в природу, а остается в культурной среде в качестве скорбных ювелирных изделий или материальных скорбных «передач» в грядущее бессмертие.

Как доказывает целый ряд современных ученых, разум существует на многих уровнях и, в первую очередь, он присущ Вселенной в целом, а на значительно более низком уровне – той части Вселенной, которую мы называем Природой (имея в виду разум человечества в целом и отдельных людей). Обращая внимание на известную работу К. Э. Циолковского «Разумные силы Вселенной» и целый ряд работ современных космологов, разделяющих концепцию направленной панспермии, в данный момент мы ничего не добавляем и не комментируем, а просто констатируем наличие такого подхода. И видим в этом ракурсе проблемы тот удивительный и трагический факт, что человечество может действовать в каких-то своих собственных интересах, которые могут противоречить и закономерностям развития Вселенной, и некоему стабильному состоянию планетарного космоса, хрупкому равновесию Природы, в котором человечество только и может жить и выживать.

Как подчеркивает испанский философ Х. Ортега-и-Гассет, разум человеческий может объяснить потребность и возможность человека отказаться от наличного (природного) ради «высшего» (или «низшего»; в любом случае – иного), разумного, не присущего животным. Исследуя проблему появления техники в человеческой цивилизации, Ортега-и-Гассет подчеркивал, что она действует небиологически, поскольку «технические действия вовсе не предполагают цельное непосредственное удовлетворение потребностей... Наоборот, цель технических действий – преобразование обстоятельств, ведущее по возможности к значительному сокращению роли случая, уничтожению потребностей и усилий, с которыми связано их удовлетворение» [17].

Итак, мы выяснили, что «Природа» может быть рассмотрена нами как:

- подсистема целостного космоса планеты Земля как «естественного пространственного тела»;
- познанная часть планетарного космоса Земли и потенциальная часть изученного пространства Солнечной системы;
- среда непосредственной деятельности человека здесь и сейчас, уже включающая освоение Луны и ближайших планет Солнечной системы;
- сфера разумной жизнедеятельности человека.

Вслед за философом Х. Ортегой-и-Гассетом, мы подчеркнем, что в отличие от других живых существ, благодаря своему разуму, «человек творит новые, благоприятные (для себя! – В.К.) обстоятельства и ... выделяет из себя сверхприроду, приспособлявая природу как таковую к собственным нуждам» [18].

«Сверхприроду», упоминаемую испанским философом, или, «вторую природу» (М. Горький) мы обычно называем «Культурой».

Именно в ракурсе неразрывной связи Природы и Культуры в человеческой деятельности, попробуем рассмотреть понятие Культуры, опираясь на представленную нами схему встроенности Природы в иерархию космосов – планеты Земля, Солнечной системы, Галактики и Вселенной. Таким образом, Культуру можно определить как некую промежуточную подсистему, имеющую непосредственное отношение ко всей иерархии космосов: от подсистемы Природы в планетарном космосе Земли – до космоса Вселенной.

Фундаментальный вопрос о соотношении Природы и Культуры сразу разворачивается в двух плоскостях – рассмотрении взаимосвязи и противостояния человеческой Культуры и Природы. В общем плане его можно сформулировать так: была ли в нас изначально заложена идея инноваций самой Природой или в человечестве проявились некие «сверхспособности» к созданию Культуры, которые Природой не предполагались?

Или иначе: является ли человеческая Культура «плотью от плоти» Природы или она каким-то образом «встроена» в нее, и, по своему существу, Культура есть нечто кардинально иное по сравнению с Природой?

Рассмотрим некоторые версии решения проблемы соотношения Культуры и Природы:

1. Оптимистическая версия 1

Культура является неизбежным результатом творчества Вселенского Разума, и в своих основах уже предзадана Природе и, в конце концов, человечеству.

В классических цивилизационных концепциях появление цивилизаций (понимаемых, в первую очередь, как высокий уровень культурного развития) часто связывается с неким «внешним» воздействием на человечество (например, у А. Тойнби – божественный «вызов», на который отдельные человеческие сообщества «отвечают» напряженным культурным развитием; у Л. Н. Гумилева – космическое воздействие на пассионариев, определяющих появление и развитие этноса и его уникальной культуры). Это явный аналог аристотелевскому «первотолчку» в отношении одновременно и Природы, и Культуры. Или иначе: и Природа, и Культура представляют собой единую сферу существования человечества, каким-то образом предусмотренные или предуготовленные для развития человечества.

Однако вполне вероятно, что такие вселенско-космические «первотолчки», стимулирующие возвышение человечества и формирование цивилизации, являются просто наиболее заметными явлениями в системе посто-

янных взаимодействий человечества со Вселенной. С одной стороны, ряд известных ученых и философов признает наличие «Вселенского Разума», неких вселенских высокоразвитых цивилизаций, непосредственно воздействующих на наш космос и природу [19]. С другой стороны, формирование цивилизаций предполагает уже достаточно высокое и специфическое развитие общечеловеческой Культуры, ее готовность к взлету, довольно резкую дифференциацию различных племенных, этнических и социально-групповых культур. Таким образом, необходимо не только признать «макро-» и «мегауровень» рассмотрения Культуры в ее непосредственных и постоянных связях со Вселенной, но также исследовать систему сложных взаимодействий между вселенским (обозримым галактическим и солнечным), общечеловеческим и индивидуальным культурными уровнями, формируемыми непосредственно в Природе.

Если согласиться с Ф. Криком в том, что мы являемся только «тарой», наиболее удобной и безопасной «упаковкой» для молекулы РНК, которую в неизвестном нам будущем ждет какое-то великое вселенское предназначение, то Культура, видимо, и является некоей гарантией сохранности нашей генной программы в Природе, как наиболее оптимальной среде. И отличие Культуры от Природы предзадано именно в силу уникальности человеческого генома по сравнению со всеми остальными природными явлениями.

Если отвлечься от биологизирования нашей проблемы, в философском плане Культура может быть рассмотрена как форма реального и устойчивого взаимодействия между низшими космосами и высшими уровнями мироздания. Иными словами, есть вероятность того, что Культура как таковая нужна только людям, но именно она позволяет человечеству не только выживать в Природе, но и, по изначальному замыслу, осуществлять связь всех космосов мироздания.

2. Оптимистическая версия 2

Культура создается человечеством благодаря неким потенциалам, которые выявляют его «сверхприродные» силы. Таким образом, человечество действует в интересах Вселенной и высших космосов, но не обязательно в интересах той Природы, которая его выкормила.

Здесь можно снова привлечь идеи Циолковского о «терминальной» эре в процессе развития человечества, как активного космического субъекта, теряющего свою биологическую форму и превращающегося в световую энергию и окончательно соединяющегося с вселенским разумом через миллиарды лет своего развития.

Также можно развить мысль Х. Ортеги-и-Гассета о том, что «человек несводим к природным обстоятельствам, а только погружен в них». Иначе говоря, в отличие от животного, которое не может существовать вне природных обстоятельств, будучи их неотъемлемой частью, человек, по мнению испанского философа, «способен от них избавиться и, самоуглубившись, сосредоточиться на себе».

«Сверхприродность» человеческих сил определяется не тем, что они превосходят известные физические и прочие естественные законы, а тем, что человек обретает те способности, которые ему не присущи изначально. Когда он летает как птица, ныряет на большую глубину и долго там находится как рыба, или выживает при сверхвысоких или сверхнизких температурах, он только с точки зрения обычных людей становится «суперменом». Но вот когда современные технологии в направлениях трансгуманизма позволяют человеку обретать небывалые в Природе органы или свойства, которые в принципе не присущи биологическим организмам на Земле, можно уже совершенно определенно говорить о «сверхприродности» человека. Биостимулятор на сердце или искусственная почка, не говоря уже о микрочипах в мозге или нанороботах в крови – все это реальные сверхвозможности разумного и технологически оснащенного человека современной Культуры, бросающего прямой вызов взрастившей его Природе.

3. Рационалистическая версия

Культура есть неотъемлемая часть Природы, ее высшее достижение, в определенном смысле – ее некая цель.

В сущности, в подобном убеждении существует значительная часть современного человечества. Трансформация нынешней Природы предполагает постоянное совершенствование человека, а с развитием дальних космических полетов само понятие «Природы», как условий возможного существования людей, будет расширяться до мыслимых пределов (Солнечной системы, Галактики, Вселенной). Не нужно сбрасывать со счетов тот факт, что человечество, как часть Природы, неспособно существовать без Культуры, как особой «среды», необходимой для собственно человеческого существования. (Даже самые дикие человеческие племена отличаются от стад и стай животных наличием Культуры, пусть и самой элементарной.) И в целом Культура выступает особым фактором, позволяющим увеличить природный «иммунитет» и раскрыть ее разнообразные потенциалы для ее же, Природы, дальнейшего совершенствования и развития.

В терминах христианства можно порассуждать о том, что первый человек знал идеальную «Природу» в раю, где был впервые «порожден»; потому рай поистине «природен» ему. Человечество, имея идеал Природы, но помещенное в другие условия, бесконечно совершенствует ту «нерайскую» материальную среду, в которой сейчас реально находится. При этом осознавая (в лице своих лучших представителей), что, даже не будучи идеальной, окружающая его природная среда является «божественной средой» (используя термин П. Тейяра де Шардена [20]), в значительной мере стимулирующей его к бесконечному совершенствованию.

С этой точки зрения трансформация нынешней Природы под воздействием Культуры предполагает постоянное совершенствование одновременно и челове-

чества, и Природы. И если в условиях планеты Земля Природа породила (или вырастила) Культуру, то на этапе освоения человеком Солнечной системы и т.д. Природа вместе с развитием Культуры будет трансформироваться и выходить на более высокие космические уровни.

4. Вариант рационалистической версии:

Человечество, как часть Природы, создает Культуру, выступающую источником необходимого самой природе «дифференцированного хаоса», увеличивающего природное разнообразие для ее дальнейшего совершенствования и развития и без человечества.

При этом даже разрушительное воздействие современной техногенной цивилизации Природа может воспринимать как неизбежное зло, необходимое для ее собственного будущего развития или даже нового (очередного?) перерождения. По существу, экологическая катастрофа, в которую себя загнало человечество, убивает его самоё, а Природа (и в целом – планета Земля) способна дождаться гибели или бегства человечества, а затем возродиться в новом блеске. (Сегодня уже создана целая серия книг и фильмов о том, как планета возрождается после исчезновения человечества с ее поверхности).

5. Грустная версия

Культура, будучи «плотью от плоти» Природы, может быть формой самоубийства природы, которая таким образом проживает свою собственную «судьбу».

Как известно, всё в Природе смертно, и сама Природа также, видимо, не бессмертна, как, возможно, и Вселенная (по крайней мере, известная нам).

Исходя из концепции Большого Взрыва, наша Вселенная существует только ок. 13 млрд лет, а наша Солнечная система, как потенциальная Природа, и сама планета Земля = вероятная Природа – 5 млрд лет.

В Природе жизнь неразрывно связана со смертью. В современной биологии понятие жизни (или совокупность признаков жизни) обязательно включает представление о неизбежности смерти (конечности существования биологического объекта). Есть вероятность того, что в Природе может быть механизм ее глобального самоуничтожения (некий «ген смерти» или инстинкт саморазрушения). Так, в любой биологической клетке с момента ее появления Природой заложен «таймер» – теломер на кончике каждой хромосомы, определяющий число делений данной клетки. В любом сложном организме предусмотрена программа старения и неизбежного умирания.

Наши выдающиеся философы Н. Я. Данилевский и Л. Н. Гумилев исследовали конечность существования культурно-исторических типов и этносов, предполагая, что именно Культура оказывается их возрастным показателем. Фазы культурного развития (у Данилевского – от формирования культурно-исторического типа до его исчезновения, а у Гумилева – от пассионарного «взрыва» до упадка культуры в форме цивилизации) обозначают основные этапы развития

и умирания не только больших человеческих сообществ, но и тех природных ареалов, в которых они возникли и существовали. Майя, уничтожившие леса и сами погибшие от этой рукотворной катастрофы; африканские племена, превратившие плодородные земли в пустыню Сахара; в конце концов, глобальная экологическая катастрофа, в которой существует современное человечество...

В рамках этой версии можно предположить, что Культура, как некое интегральное состояние человечества, является стадией неизбежного умирания Природы, а Цивилизация, особенно техногенная – завершающим траурным аккордом.

6. Оптимистический вариант грустной версии

Культура, являясь завершающим аккордом в существовании определенной части Вселенной, называемой нами Природой, знаменует собой также момент возможной эстафеты жизни – определенной формы неприродного бессмертия живого во Вселенной.

Человеческая Культура порождает надприродные формы трансляции накопленного опыта и, преодолевая природные закономерности, передает его следующей новой «родине», осуществляя космический перелет. И часть Природы, таким образом, обретает продолжение в новых космических условиях. Уже сегодня в полуфантастических проектах заселения Марса совершенно очевидно, что марсианская «Природа» категорически отличается от земной. Но человеческая Культура неизбежно будет трансформироваться и развиваться по новым путям в небывалых условиях другой планеты.

Судьба человеческой Культуры может быть отлична от «судьбы» Природы. Скажем, если Земля через 5 млрд лет обречена сгореть в огне Солнца, которое превратится в Красного гиганта, а само Солнце неизбежно взорвется и погибнет, превратившись в холодного белого карлика, то человечество, обладающее высокой технологической Культурой, способно перелететь на новое место жительства, как в пределах Солнечной системы (на Марс, Титан, Плутон и т.д.), так и в будущем – за ее пределы, в частности, на те экзопланеты, пригодные для жизни, которые открыты уже сегодня.

О космических путешествиях написано немало книг и снято фильмов. В традициях русского космизма (К. Э. Циолковский, А. Л. Чижевский, В. И. Вернадский) освоение дальнего космоса и даже всей Вселенной рассматривается как неизбежность.

Не пытаясь защищать какую-то одну версию, и не претендуя на их исчерпывающий список, попробуем отыскать возможное решение проблемы, которое удовлетворит нас «здесь и сейчас». Поскольку человечество еще существует, вероятно, «это кому-нибудь нужно», кроме него самого. Имея в виду целый спектр возможных вариантов будущего, просто констатируем, что Культура – это особая реальность, существующая в Природе и имеющая свои основания на самых глубинных уровнях вселенского бытия. Вполне возможно, что мы придаем слишком большое значение своей Культуре и челове-

честву, как таковому. Может быть, действительно, мы – случайное явление в многообразной Вселенной, которая, даже не заметив нашего существования, с нами или без нас, всегда будет продолжать свое могучее развитие.

Однако давно уже сформулированный антропный принцип, говорящий о том, что в «планах» самой Вселенной был запрограммирован человек и появление человеческой Культуры как таковой, является обязательным этапом в развитии мироздания, – этот принцип многим сердечно близок и представляется логически убедительным. (Можно обсуждать сильную и слабую стороны антропного принципа, но суть в том, что утверждается «нормальность» и «естественность» самого факта появления человеческой Культуры, неважно – как временного или постоянного явления в мироздании).

Принципиальная неразрешимость вопроса о причинах возникновения человечества как части Природы, приводит к исходной неопределенности проблемы соединения понятий «Культура» и «Человек» (Человечество). Возможно ли существование Культуры помимо человека? А существование Человека вне какой бы то ни было Культуры? Является ли Культура отличительной и определяющей чертой Человека, как человека?...

Наиболее вероятным решением проблемы взаимодействия Природы и Культуры в аспекте их встроенности в иерархию космосов, представляется такое: Природа и Культура, как некие подсистемы космосов мироздания, в своем противоречивом взаимодействии образуют некий собственный особый «космос». Очевидно, что при своем «зарождении», в этом «Природно-Культурном космосе» превалирует природное начало, но затем именно культурная его часть позволит ему, как и другим космосам в мироздании, приспособляться и трансформироваться, бесконечно развиваться и перерождаться в безграничном мироздании.

Говоря о возможности различения космических уровней Природы и Культуры, мы, как и век тому назад русские космисты, можем только наметить будущие этапы движения человечества по ступеням планетарного, галактического и вселенского развития. Но уже сегодня можно выявить систему реальных взаимодействий Природы и Культуры на основе все более глубоко познаваемых духовно-материальных энергий. Подробное рассмотрение энергетической концепции Культуры на различных космических уровнях мироздания представлено в моей монографии [21].

Литература

1. Аристотель. Физика II, 199b. См.: Аристотель. Соч. в 4 тт. Т.3. М.: Мысль, 1981. – С. 86.
2. Рассел, Б. История западной философии и ее связи с политическими и социальными условиями от античности до наших дней / Б. Рассел. – М.: Академический проект, 2000. – С. 201–202.
3. Вернадский, В. И. Химическое строение биосферы Земли / В.И. Вернадский. – М.: Наука, 1987. – С. 150.

4. Р. Коллин выделяет отдельные «тела» – Солнце и планеты Солнечной системы. – Коллин, Р. Теория небесных влияний. Человек, Вселенная и тайны космоса / Р. Коллин. СПб.: Весь, 2011.
5. По определению Новой философской энциклопедии, «'космос' – это понятие древнегреческой философии, в котором выражено представление о мире как упорядоченном, рационально организованном, одушевленном целом. Космос противопоставлен хаосу как неопределенному, бесформенному состоянию мира» // Новая Философская энциклопедия: в 4 т. / Ин-т философии РАН, Нац. Общ.-научн. Фонд; Научно-ред. совет, предс. В.С. Степин. – М.: Мысль, 2010. Т.2. – С.315.
6. Коллин, указ. соч. С. 33.
7. Коллин, указ. соч. С. 30–31.
8. См., например: Циолковский, К. Э. Ум и страсти. Воля Вселенной. Неизвестные разумные силы / К.Э. Циолковский. – М., 1993.
9. Освоение Марса идет ускоренными темпами. О готовящемся создании ответвления человеческой цивилизации на Марсе и уже сегодня видимых проблемах взаимоотношения с ней см. мои статьи: Кравченко, В. В. Экстра- планетарная культура и контуры будущего диалога космических человеческих цивилизаций // Диалог культур: социальные, политические и ценностные аспекты / В.В. Кравченко. – М.: Канон+, РООИ «Реабилитация», 2015. – С. 309–316; Кравченко, В. В. Освоение Марса: космическая колонизация или проект новой человеческой цивилизации? / В.В. Кравченко // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 183–188.
10. Браун, М. Как я убил Плутон и почему это было неизбежно / М. Браун. – М.: Карьера Пресс, 2012.
11. См.: Чижевский, А. Л. Земное эхо солнечных бурь / А.Л. Чижевский. – М.: Мысль, 1976.
12. Предлагаю еще одно курьезное определение освоения природы: это часть мироздания, где есть человеческий мусор. В Интернете была байка о том, что когда на Марс опустился один из марсоходов (то ли Спирит, то ли Оппортьюнити), заработала его телекамера и зафиксировала мельтешение чего-то белого, будто с ушами... Марсианский заяц?! Оказалось, что какая-то часть упаковки или защитных средств самого марсохода была отброшена им за ненужностью и носится марсианским ветром (скорость до 50 км/ч). В общем, Марс освоили... Да и сами эти марсоходы уже совсем скоро превратятся в груды металла, надолго «украшив» собой марсианский пейзаж. Как и десятки (!) других, отработавших свой срок исследовательских аппаратов, присланных человечеством с Земли на Марс. О количестве космического мусора, как результата «освоения» околоземного пространства нашей планеты даже говорить не приходится...
13. См.: воспоминания о беседах с К. Э. Циолковским: Чижевский, А. Л. Теория космических эр [Электронный ресурс] / А.Л. Чижевский. – Режим доступа: <http://www.tsiolkovsky.ru/index.php?option>, свободный. – Загл. с экрана.
14. Так, по определению Новой Философской Энциклопедии: «человек как сущее, выходящее за рамки живого мира и в известной мере противостоящее ему».
15. Вернадский, В. И. Автотрофность человечества / В.И. Вернадский // Русский космизм: Антология философской мысли. Сост. С.Г. Семенов, А.Г. Гачевой. – М.: Педагогика - Пресс, 1993. – С. 280.
16. Вернадский, В. И. Химическое строение биосферы Земли / В.И. Вернадский. – М.: Наука, 1987. – С. 51.
17. Ортега-и-Гассет, Х. Размышления о технике / Х. Ортега-и-Гассет // Избранные труды / Х. Ортега-и-Гассет. – М.: Весь Мир, 2000. – С. 200.
18. Ортега-и-Гассет, указ. соч., С. 201.
19. Достаточно напомнить некоторые работы: Циолковский, К. Э. Ум и страсти. Воля Вселенной. Неизвестные разумные силы / К.Э. Циолковский. – М., 1993; Крик, Ф. Жизнь как она есть: ее зарождение и сущность / Ф. Крик. – М., 2002. (Один из первооткрывателей структуры ДНК, Нобелевский лауреат Ф. Крик подчеркивал неслучайность появления жизни, развивая концепцию направленной панспермии и идеи Вселенского Разума).
20. Тейяр де Шарден, П. Божественная среда / П. Тейяр де Шарден. – М.: «Ренессанс»; СП «ИВО-Сид», 1992.
21. Кравченко, В. В. Симфония человеческой культуры / В.В. Кравченко. – М.: Аграф, 2017.

Беспилотный летательный аппарат самолетного типа. Летающее крыло «МАРС-3»

ЗАО «Институт телекоммуникаций» производит *беспилотные летательные аппараты* с 2005 года как отдельно, так и в составе комплекса площадной съемки.

Назначение комплекса — дистанционное наблюдение местности и построение изображений поверхности земли (тепловизионная и аэрофотосъемка, видеонаблюдение, передача информации в реальном времени). Состав комплекса: БПЛА, аппаратура приема и передачи, АРМ мониторинга.

Основные ТТХ БПЛА «Марс-3»:

- размах крыльев, м: 2,18;
- длина, м: 1;
- максимальная взлетная масса, кг: 4,5;
- масса полезной нагрузки, кг: 2,3;
- крейсерская скорость, км/ч: 65;
- максимальная скорость, км/ч: 110;
- максимальное время полета, мин: 180.

Преимущества данной модели:

- использование конструкции парящего крыла, обуславливающее меньшие энергозатраты аккумуляторов;
- возможность полета в автоматическом режиме по заранее выбранному маршруту;
- возможность переноса большой полезной нагрузки;
- доступная цена;
- получение видео с камеры в режиме реального времени;
- изображение с камеры с географической привязкой.

Сферы применения беспилотного аппарата:

- контроль наземных и морских границ;
- мониторинг линейно-протяженных объектов;
- контроль и мониторинг больших скоплений людей;
- решение сельскохозяйственных задач;
- контроль распространения лесных пожаров;
- решение специальных задач.



Конструкцией беспилотного летательного аппарата «Марс-3» является летающее крыло — идеальная платформа для переноса большой полезной нагрузки, обладающее высокой выносливостью.

Модель отличается превосходным аэродинамическим качеством: даже при крейсерском полёте на достаточно высоких скоростях не требуется большая мощность мотора, что увеличивает время и дальность полёта.

Внутри самолёта находится обширный отсек, в который размещается практически любой набор оборудования для аэрофотосъемки. Использование для изготовления корпуса композитных материалов делает самолет очень легким (2,2 кг). При этом вес полезной нагрузки (камеры, источники питания и т.д.) составляет до 2,3 кг.

Управление самолетом осуществляется в автоматическом и полуавтоматическом режимах. В автоматическом режиме от взлета до посадки полет самолета осуществляется по заранее выбранному маршруту в режиме автопилота. В полуавтоматическом режиме взлет, посадку и полет в прямой видимости осуществляет оператор, после чего управление передается автопилоту.

Для получения дополнительной информации по беспилотным летательным аппаратам, стоимости и ТТХ, пожалуйста, обратитесь в отдел маркетинга по номеру +7 (812) 740-77-07 или по электронной почте marketing@itain.spb.ru.

На правах рекламы

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

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**

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

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: 30.06.2017

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 «Типография Группа М»
194022, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, д. 4а, стр. 3
Тел.: (812) 325-04-04
www.gmprint.ru

Свободная цена