

Содержание

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Попов Д.И.

Оценивание временного положения когерентно-импульсных сигналов

6

Методом максимального правдоподобия синтезирован оптимальный алгоритм оценивания временного положения последовательности когерентных импульсов на фоне гауссовской коррелированной (пассивной) помехи. В соответствии с алгоритмом оценивания осуществляется межпериодная обработка поступающих данных с последующим весовым интегрированием и фиксацией максимума получаемых величин. Рассмотрены цифровые эквиваленты синтезированного алгоритма, на основе которых построена структурная схема цифрового измерителя.

Смирнов Д.В., Бекренев С.А., Чайков С.С.

Постановка задачи нахождения оптимальных цифровых порогов обработки сигналов кадровой синхронизации в подсистеме кадровой синхронизации сети радиосвязи с подвижными объектами в условиях помех

11

В статье представлены особенности построения сети радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами и ее подсистемы кадровой синхронизации. Показано влияние структуры сигнала кадровой синхронизации и цифровых порогов на вероятностные характеристики процесса обработки данных сигналов. Обоснована необходимость применения сигналов кадровой синхронизации сложной структуры. Представлена математическая постановка задачи нахождения оптимальных цифровых порогов обработки сигнала кадровой синхронизации сложной структуры.

Сторожук Н.Л., Ясинский С.А., Зюзин А.Н.

Формализованный подход к применению метода наложения для принятия решения на модернизацию и развитие транспортных сетей связи

15

В статье описывается формализованный подход к применению метода наложения для модернизации фрагмента транспортной сети связи средствами технологии Wavelength-division multiplexing (WDM) – спектрального уплотнения каналов. Предлагается разделить процесс на три этапа. На первом этапе определить топологию модернизируемых линий связи, решив задачу на минимальном взвешенном покрытии. На втором – рассчитать необходимое количество спектральных каналов для каждой линии связи. На третьем этапе произвести энергетический расчет каждой модернизируемой линии связи с учетом текущих характеристик кабельно-линейных сооружений и параметров устанавливаемого оборудования.

Владимиров С.А., Владимиров С.С.

Обобщенная модель сигнального процесса Nartic-кодека на базе быстросходимых полиномов

20

Произведена постановка задачи Nartic-кодека, как взаимосвязанной параметрической системы регулирования, и приведена структура обобщенной модели сигнального процесса Nartic-кодека. Рассмотрено формальное разбиение полной системы элементов управления для кодека на подсистемы, для каждой из которых определена передаточная функция сигнального параметра. Предложена общая идея процедуры аппроксимационной обработки сигналов Nartic-кодека для одного параметра.

Щесняк А.С.

Оценка пространственных характеристик антенной системы мобильного узла интеллектуальной транспортной системы при его работе в одном частотном диапазоне с первичной сетью радиосвязи

25

В статье рассмотрена совмещенная однородная вторичная сеть радиосвязи (ВСП), функционирующая в интересах интеллектуальной транспортной системы (ИТС) в одном частотном диапазоне с первичной сетью оператора фиксированной радиосвязи (ПСП). Представлены результаты моделирования управляемых антенных систем, исходя из ширины диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности в двух главных плоскостях, с целью определения значения отношения сигнал к смеси шума и помехи (ОСШП) на входе приёмопередающего оборудования ПСП.

Власов И.И.

Что есть так называемые «Когерентные системы передачи»?

30

Представленная статья рассказывает о том, что такое оптические системы с когерентным гетеродиновым приемом, называемые на профессиональном сленге связистов «когерентными системами». Автор описывает принципы построения таких систем, ссылается на используемые в них патенты и стандарты, дает определения и сравнения разных оптических компонентов систем передачи с когерентным оптическим приемом, упоминает о применяемых в них методах кодирования линейного сигнала.

Сорокин К.Н.

Модель системы управления параметрами линии радиосвязи на основе нечеткой логики

39

В статье представлена обобщенная модель когнитивной радиосистемы и структурная модель системы управления на основе нечеткой логики. На основе задаваемых требований выбраны входные данные и управляемые параметры, описан принцип принятия обобщенного решения на реконфигурацию системы. Применение искусственного интеллекта в системах управления позволит повысить эффективность функционирования сетями радиосвязи в сложной помеховой обстановке.

Присяжнюк А.С., Присяжнюк С.П.

Модель управления когнитивной декаметрового радиосетью

44

Рассмотрены особенности радиосетей в декаметровом диапазоне частот. Предложена информационная модель управления когнитивной радиосетью в декаметровом диапазоне частот. Рассмотрена радиосеть общего пользования со сплошной зоной радиопокрытия больших территорий.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Дюк В.А., Комашинский В.И., Мальгин И.Г., Сенкевич Ю.И., Аванесов М.Ю.

Исследование метода эмпирической модовой декомпозиции в задаче анализа сигналов акустической эмиссии

50

Приведен краткий обзор существующих методов первичного преобразования нестационарных сигналов. Отмечены недостатки традиционных методов. На примерах анализа сигналов акустической эмиссии показаны преимущества метода эмпирической модовой декомпозиции Хуанга. Полученные результаты продемонстрировали богатую палитру возможностей метода эмпирической модовой декомпозиции.

Осадчий А.И., Попов С.Г., Осадчий С.А.

Некоторые вопросы концепции национальной безопасности в контексте глобальной цифровизации 56

Бурное развитие Интернет-технологий и формирование большого массива данных (Big Data) в глобальных сетях привело к необходимости обеспечения национальной безопасности государства. В Российской Федерации в условиях санкций и импортозамещения иностранного оборудования и технологий возникает необходимость закрытия доступа к информации о разработке новых информационных и промышленных технологий в России. В статье предлагается подход к построению концептуальной модели национальной безопасности при формировании данных и цифровой модели объекта в контексте глобальной цифровизации.

Бойченко О.В.

Методологии проектирования программных средств в решении задач идентификации данных 61

В статье исследованы современные направления решения проблем совершенствования методологий проектирования программных средств, ориентированных на данные, что позволяет решать вопросы количественного определения масштабности и полноты данных информационной системы для установления их достоверности, как основного критерия, отличающего уровень защищенности информации. Предложено использование методов формальных спецификаций в совершенствовании научно-методического аппарата количественного определения достоверности данных автоматизированной управляющей информационной системы через показатели масштабности и полноты содержания информационных ресурсов.

Гусеница Я.Н., Микляев Д.С.

Программное обеспечение автоматизированного рабочего места метролога-эксперта 66

В работе подложена программная реализация методики обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники на основе разработки программного обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта. Описан состав, назначение и особенности программных модулей и математического обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта, реализующих приведенные выше функции. Представлен пример окон графического пользовательского интерфейса программного обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта.

Пиховкин Н.Л., Попов И.Ю., Карманов А.Г., Карманова Н.А.

Детектирование сетевых распределенных атак на основе алгоритмов машинного обучения 73

В статье описывается метод детектирования атак, включающий в себя генерацию наборов вредоносного трафика и трафика легитимных пользователей, а также проводится оценка возможности применения алгоритмов классификации на основе машинного обучения с учителем для детектирования сетевых распределенных атак типа «отказ в обслуживании».

Скороходов Я.А.

Синтез пассивной многопозиционной радиолокационной системы на базе группировки малых космических аппаратов 81

В работе представлен комплекс алгоритмов оценивания целевых показателей функционирования пассивных многопозиционных радиолокационных систем землеобзора и их синтеза на основе модельно-кибернетических экспериментов. Оптимизируемой величиной является один из параметров орбитального движения космических аппаратов (высота орбиты или расстояние между спутниками), образующих баллистически связанную группу, при соблюдении условия определения координат источников радиоизлучений с точностью в среднем не ниже заданной.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Казарян М.А., Шахраманьян М.А., Рихтер А.А., Мурынин А.Б.

Построение 3D-моделей ригидных объектов по одному изображению методом пространственных сеток 90

Предлагается метод интерактивного построения трёхмерных моделей ригидных объектов по данным одного изображения с помощью координатных сеток и привязки частей объектов к ним при предположении о форме объекта. Описываются общие подходы к решению задачи. Приведена блок-схема метода построения 3D-модели и обрисованы основные этапы обработки. Показан математический аппарат метода, описана схема процедур построения контура (точек, линий, полигонов и полиэдров) трёхмерного объекта и его текстурного заполнения, пространственных преобразований объекта по одному изображению.

Цветков В.Я., Ознамец В.В., Филатов В.Н.

Решение задачи Лаунхардта в нечеткой ситуации 103

Рассматривается задача размещения пространственного объекта в условиях нечеткой информации. Раскрывается постановка задачи размещения. Вводятся понятия «нечеткая информационная ситуация» и «нечеткая пространственная информационная ситуация». Показано различие между четкой информационной ситуацией и нечеткой информационной ситуацией. Описана связь между лингвистическими переменными и информационной ситуацией. Показано, что поиск оптимума основан на пересечении нечетких множеств. Дано решение задачи в двух вариантах: при условии равнозначности критериев размещения и при условии их неравнозначности. Описаны условия и ограничения данного метода. Отмечено предпочтение применения термина «целесообразность» при мягких вычислениях термину «оптимальность». Метод позволяет проводить пространственный анализ при достаточно большом числе критериев.

Дышленко С.Г.

Алгоритм векторного решения некомпланарной засечки 110

В статье предлагается алгоритм решения прямой засечки при нарушении условия компланарности. Классический алгоритм с сохранением условия компланарности входит в данный алгоритм как частный случай. Для анализа алгоритма первоначально рассматривается прямая засечка для идеальной стереопары. В статье доказано, что наличие погрешностей измерения координат точек снимка создает условия для нарушения условия компланарности. Основная идея алгоритма заключается в рассмотрении некомпланарных векторов как скрещивающихся прямых. Кратчайшее расстояние между двумя векторами, направленными по скрещивающимся прямым, коллинеарно векторному произведению. Эта закономерность дает основание ввести векторное произведение некомпланарных векторов в уравнение решения засечки. Расстояние между некомпланарными прямыми дает возможность оценить погрешность вычислений. Это позволяет оценивать качество обработки информации.

Хрущ Р.М., Гринь А.Н., Соловьёв А.В.

Минимизация метрических искажений снимков стереопары в процессе ректификации 116

В статье предложен способ уменьшения геометрических искажений при ректификации стереопары с произвольными элементами ориентирования. Предложенный способ позволяет не только минимизировать искажения, но и выполнить их количественную оценку. Экспериментальная проверка предложенного способа показала возможность существенно повысить точность обработки.

Филиппских Е.Э., Попов А.В., Галкин Ф.А., Захарчук А.В.

Формирование прогнозных изображений видимого диапазона на основе трехмерных цифровых моделей местности с текстурным покрытием 121

В статье приводится описание предложенного авторами метода формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе использования трехмерных цифровых моделей местности, содержащих в своем составе текстурные покрытия. Рассмотрены варианты применения подобных прогнозных изображений при решении задач сопровождения на всех этапах их жизненного цикла существующих и перспективных оптических датчиков средств мониторинга земной поверхности. Представлены примеры расчета прогнозных изображений местности видимого диапазона с использованием разработанного экспериментального программного модуля, реализующего предложенный метод.

Зализюк А.Н., Гоманов Д.Е., Присяжнюк С.П.

Геоинформационные объектно-ориентированные модели формирования образного мышления 129

Рассмотрена специфика геоинформационного обеспечения современных систем поддержки принятия решений. Предложенные объектно-ориентированные модели местности для формирования образного мышления использованы в современных системах генерализации мультимасштабных электронных геопространственных данных. Предложены модели мультимасштабных электронных карт местности для формирования образного мышления.

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Свиридов К.Н., Тюлин А.Е.

О проектировании оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли 136

Рассматриваются два подхода к проектированию оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), основанные на двух разных критериях оценки предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) на местности. Первый подход к проектированию ОЭА КА ДЗЗ использует известный критерий оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности GSD, основанный на проекции одного пикселя цифрового детектора на зондируемую земную поверхность. Критерий GSD дает оптимистичную, но ошибочную оценку предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, а главное, его использование при проектировании ОЭА КА ДЗЗ имеет ограниченное применение, так как не позволяет согласовать объектив и цифровой детектор по критерию Найквиста для обеспечения возможности достижения дифракционного предела разрешения КА ДЗЗ на местности. Новый критерий, предложенный в РКС, основан на формировании проекции периода дискретизации (двух пикселей) цифрового детектора на зондируемую земную поверхность. Этот критерий, в отличие от GSD, позволяет при проектировании ОЭА КА ДЗЗ добиться максимального совершенства проектируемой ОЭА, а именно, согласовать объектив и детектор по критерию Найквиста и обеспечить достижение дифракционного разрешения КА ДЗЗ на местности.

Гончаревский В.С.

Программы полярного управления относительным движением при неизменной ориентации космических аппаратов 146

В статье рассматриваются вопросы отыскания программ полярного управления относительным движением космических аппаратов, которые позволяют выполнить взаимный маневр при неизменной ориентации активного аппарата. В результате решения краевых задач для дифференциальных уравнений, описывающих относительное движение, найдены управляющие воздействия, требуемые для осуществления отдельных разновидностей маневра. Получены соотношения, позволяющие оценить энергозатраты на их выполнение.

Бобровский А.Н.

Обработка видеоинформации в адаптивной системе контроля сближения космических аппаратов 149

Рассмотрены основные методы обработки видеоинформации в системе контроля сближения космических аппаратов. Показано, что, в развитие итерационного принципа контроля сближения С. П. Королёва, к этапам сближения космических аппаратов должны адаптироваться параметры разложения изображения, обработки информации в контуре управления видеоинформационной системой и в кодере источника.

Селиванов А.А., Фарафонов А.В., Ляшевский А.В., Миронов Е.А.

Реализация автономного распределенного управления орбитальными системами космических аппаратов с использованием современных информационных технологий 154

В статье описана методика автономного распределенного управления орбитальными системами космических аппаратов на основе использования теории многоагентных систем. В статье приведены принципы распределенного автономного управления, обоснована необходимость повышения автономности управления орбитальными системами. Материал статьи может быть полезен при обосновании требований к перспективным орбитальным системам многофункциональных малогабаритных космических аппаратов.

Мосин Д.А., Банников Е.В., Дуга В.В.

Методика формирования множества допустимых вариантов применения наземной космической инфраструктуры испытательного космодрома при решении задач запуска малых космических аппаратов 159

В статье описана методика, позволяющая сформировать множество вариантов применения наземной космической инфраструктуры испытательного космодрома. Методика состоит из семи основных этапов. Описан разработанный научно-методический аппарат, позволяющий сформировать множество допустимых по двум критериям вариантов применения. Данными критериями являются оперативность и стоимость, причем оперативность отражает требования основ государственной политики до 2030 года, а стоимость диктуется условиями рыночной экономики.

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 радиуправляемого 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.

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



* 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)

Оценивание временного положения когерентно-импульсных сигналов

Evaluation of coherent and pulse-type signals temporary position

Попов / Popov D.

Дмитрий Иванович

(adop@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный

радиотехнический университет»,

профессор кафедры радиотехнических систем.

г. Рязань

Ключевые слова: алгоритм оценивания – evaluation algorithm; временное положение – temporary position; когерентно-импульсные сигналы – coherent and pulse-type signals; пассивная помеха – passive interference; синтез – synthesis; цифровые эквиваленты – digital equivalents; функция правдоподобия – plausibility function.

Методом максимального правдоподобия синтезирован оптимальный алгоритм оценивания временного положения последовательности когерентных импульсов на фоне гауссовской коррелированной (пассивной) помехи. В соответствии с алгоритмом оценивания осуществляется межпериодная обработка поступающих данных с последующим весовым интегрированием и фиксацией максимума получаемых величин. Рассмотрены цифровые эквиваленты синтезированного алгоритма, на основе которых построена структурная схема цифрового измерителя.

Fully satisfactory algorithm for evaluation of coherent pulses sequence in presence of Gaussian correlated (passive) interference has been synthesized based on the method of maximum plausibility. Processing of incoming data between cycles with subsequent weight integration and latching of maximum obtained values are carried out in accordance with evaluation algorithm. Digital equivalents of the synthesized algorithm used as the basis for generation of digital meter block schematic diagram have been considered.

Введение

Современные многофункциональные радиолокационные системы (РЛС) позволяют обнаруживать и определять координаты разнообразных объектов [1, 2]. В импульсной радиолокации одной из основных операций является измерение дальности цели [3], которое с позиций статистической теории формулируется как

оценивание временного положения (времени запаздывания) последовательности сигнальных импульсов [4].

Временное положение (время задержки – delay time) и его измерение имеют разнообразные применения в различных отраслях науки и техники. В радиолокации первоначально измерение дальности осуществлялось аналоговыми методами. С этой целью в прошлом использовались визуальные индикаторы на электронно-лучевых трубках, по которым с помощью электронных меток вручную разделяло для каждой цели грубо отсчитывалась дальность, что, в конечном счете, и привело к построению автоматизированных (цифровых) систем обработки радиолокационных сигналов.

В работах [3, 4] рассмотрен метод измерения времени запаздывания последовательности импульсов при отсутствии межпериодной корреляции помех. Измерение временного положения последовательности двоично-квантованных некогерентных сигнальных импульсов на фоне собственных (некоррелированных) шумов приемника РЛС цифровыми методами рассмотрено в работе [5]. Работа [6] посвящена синтезу различных вариантов следящих измерителей дальности для РЛС сопровождения воздушных целей в условиях отсутствия внешних помех.

Существенное влияние на точность оценивания оказывают помехи РЛС. Ввиду этого актуален поиск оптимальных алгоритмов оценивания и устройств измерения, обладающих в условиях воздействия известного класса помех наилучшей точностью. Проведение статистического синтеза оптимального измерителя позволяет проектировщикам определить пути усовершенствования реальных измерителей с целью повышения их точности.

Представляют интерес неследящие одноканальные измерители времени запаздывания (дальности) последовательности когерентных импульсов для РЛС обзора в условиях воздействия коррелированных (узкополосных) помех. Целью настоящей статьи является

статистический синтез алгоритмов неследящего измерения времени запаздывания последовательности когерентных импульсов на фоне гауссовских коррелированных помех.

Функция правдоподобия

Рассмотрим комплексную огибающую аддитивной смеси сигнала и коррелированной помехи (пассивной помехи плюс собственный шум), образующую на интервале $[0, T]$ в N периодах повторения многомерный случайный процесс $\{U_j(t)\}$, $j = \overline{1, N}$. Полагаем, что сигнал представлен последовательностью когерентных импульсов $S_j(t - \tau) = s(t - \tau)S_j = s(t - \tau)S_{0j}e^{i\varphi}$ известной формой $s(t)$ и неизвестными временем запаздывания τ и начальной фазой φ . При гауссовском распределении помехи функция правдоподобия (ФП) оцениваемого параметра τ представляет собой условный функционал плотности вероятности многомерного процесса [7], который в данном случае имеет вид

$$P[\{U_j(t)\} / \tau, \varphi] = C \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^N \int_0^T \int_0^T [U_j^*(t_1) - S_j^*(t_1 - \tau)] \times \right. \\ \left. \times W_{jk}(t_1, t_2) [U_k(t_2) - S_k(t_2 - \tau)] dt_1 dt_2 \right\}, \quad (1)$$

где C – не зависящая от U и τ константа, $W_{jk}(t_1, t_2)$ – функция, обратная корреляционной функции помехи и определяемая из системы интегральных уравнений

$$\sum_{l=1}^N \int_0^T R_{jl}(t_1, t) W_{lk}(t, t_2) dt = \delta_{jk} \delta(t_1 - t_2), \quad (2)$$

$R_{jk}(t_1, t_2) = [U_j(t_1) - \overline{U_j(t_1)}][U_k^*(t_2) - \overline{U_k^*(t_2)}] / 2\sigma_n^2$ – корреляционная функция помехи, учитывающая внутрипериодные и межпериодные корреляционные связи, σ_n^2 – дисперсия помехи, δ_{jk} – дельта-символ Кронекера, $\delta(t_1 - t_2)$ – дельта-функция Дирака.

Полагая, что неизвестная начальная фаза φ , являющаяся мешающим параметром, равномерно распределена в интервале $[-\pi, \pi]$, усредним ФП:

$$P[\{U_j(t)\} / \tau] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P[\{U_j(t)\} / \tau, \varphi] d\varphi. \quad (3)$$

Вычисляя интеграл (3) с учетом выражения (1) и относя не зависящие от значения оцениваемого параметра члены в постоянный множитель C , получим

$$P[\{U_k(t)\} / \tau] = CI_0 \left\{ \sum_{j,k=1}^N \int_0^T \int_0^T s(t_1 - \tau) S_{0j}^* W_{jk}(t_1, t_2) U_k(t_2) dt_1 dt_2 \right\}, \quad (4)$$

где $I_0\{\cdot\}$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Синтез алгоритмов оценивания

В качестве оценки по максимуму правдоподобия (ОМП) измеряемого параметра τ берется его значение, максимизирующее ФП (4) для наблюдаемых реализаций $\{U_k(t)\}$, $k = \overline{1, N}$. Правило определения ОМП временного положения τ записывается в виде

$$P[\{U_k(t)\} / \hat{\tau}] = \max_{\tau} P[\{U_k(t)\} / \tau].$$

При этом может быть использована любая монотонная функция выражения (4). Учитывая свойство функции Бесселя $I_0(z) \approx e^z$ при $z \gg 1$, что обычно выполняется в рассматриваемом случае, представим правило определения ОМП в виде

$$\ln P[\{U_k(t)\} / \hat{\tau}] = \max_{\tau} \ln P[\{U_k(t)\} / \tau],$$

которое приводит к структуре оптимального измерителя, определяемой алгоритмом вычисления его выходной величины

$$\xi[\{U_k(t)\} / \tau] = \left| \sum_{j,k=1}^N \int_0^T \int_0^T s(t_1 - \tau) S_{0j}^* W_{jk}(t_1, t_2) U_k(t_2) dt_1 dt_2 \right| = \\ = \left| \sum_{k=1}^N \int_0^T V_k(t - \tau) U_k(t) dt \right|, \quad (5)$$

где

$$V_k(t - \tau) = \sum_{j=1}^N \int_0^T s(t_1 - \tau) S_{0j}^* W_{jk}(t_1, t) dt_1, \quad k = \overline{1, N}.$$

Согласно алгоритму (5) оптимальный измеритель осуществляет интегрирование исходной смеси сигнала и помехи с «весом» $V_k(t - \tau)$ и последующее накопление результатов интегрирования.

Функции $V_k(t - \tau)$ можно связать непосредственно с функциями $R_{jk}(t_1, t_2)$. Умножая обе половины уравнений системы (2) на величины $s(t_1 - \tau) S_{0j}^*$ и интегрируя по переменной t_1 , получим

$$\sum_{l=1}^N \int_0^T R_{lk}(t, t_2) V_l(t - \tau) dt = s(t_2 - \tau) S_{0j}^*.$$

Таким образом, функции $V_k(t - \tau)$ определяются из системы интегральных уравнений Фредгольма, ядром которых является функция корреляции помехи. При периодическом зондирующем сигнале

$$R_{jk}(t_1, t_2) = R_{jk} r(t_1, t_2),$$

где R_{jk} – коэффициенты межпериодной корреляции, $r(t_1, t_2)$ – функция внутрипериодной корреляции.

Функция $r(t_1, t_2)$ является периодической функцией разности $t_1 - t_2$ с периодом повторения зондирующих сигналов T_n , т. е. $r(t_1, t_2) = r(t_1 - t_2 \pm kT_n), k = 1, 2, \dots$ Тогда

$$W_{jk}(t_1, t_2) = W_{jk}z(t_1, t_2),$$

где величины W_{jk} и $z(t_1, t_2)$ удовлетворяют соответственно уравнениям

$$\sum_{l=1}^N R_{jl}W_{lk} = \delta_{jk}, \quad \int_0^T z(t_1, t)r(t, t_2)dt = \delta(t_1 - t_2).$$

Функции $V_k(t - \tau)$ теперь принимают вид

$$\begin{aligned} V_k(t - \tau) &= \sum_{j=1}^N S_{0j}^* W_{jk} v(t - \tau) = \\ &= \sum_{j=1}^N S_{0j}^* W_{jk} \int_0^T s(t_1 - \tau) z(t_1, t) dt_1, \quad k = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где функция $v(t - \tau)$ связана с функцией $r(t_1, t_2)$ интегральным уравнением

$$\int_0^T r(t, t_2)v(t - \tau)dt = s(t_2 - \tau).$$

Выходная величина оптимального измерителя при этом определяется выражением

$$\begin{aligned} \xi[\{U_k(t)\} / \tau] &= \left| \int_0^T v(t - \tau) \sum_{j,k=1}^N S_{0j}^* W_{jk} U_k(t) dt \right| = \\ &= \left| \int_0^T v(t - \tau) X(t) dt \right|, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$X(t) = \sum_{j,k=1}^N S_{0j}^* W_{jk} U_k(t).$$

В соответствии с алгоритмом (6) в оптимальном измерителе осуществляется межпериодная обработка поступающих данных, приводящая к вычислению величин $X(t)$ и последующему интегрированию этих величин с «весом» $v(t - \tau)$. Правило определения ОМП временного положения τ теперь принимает вид

$$\xi[\{U_k(t)\} / \hat{\tau}] = \max_{\tau} \xi[\{U_k(t)\} / \tau],$$

и реализуется корреляционным методом по многоканальной схеме для фиксированных значений τ и последующим выбором канала с максимальным выходным откликом или фильтровым методом в одном канале с решающим устройством, фиксирующим максимум величины $\xi[\cdot]$.

Синтезированные алгоритмы представляют интерес в качестве аналоговых прототипов цифровых эквивалентов алгоритмов оценивания.

Цифровые эквиваленты алгоритмов оценивания

При аналого-цифровом преобразовании комплексных огибающих $U_j(t)$ исходных данных в результате временной дискретизации и последующего амплитудного многоуровневого квантования образуется последовательность цифровых отсчетов $U_{jl} = x_{jl} + iy_{jl}$, где j – номер текущего периода повторения, l – номер текущего интервала временной дискретизации. Переход к цифровому эквиваленту осуществляется путем замены непрерывных функций их дискретными отсчетами. Межпериодная обработка в каждом интервале временной дискретизации описывается алгоритмом

$$X_l = \sum_{j=1}^N S_{0j}^* Y_{jl} = \sum_{j=1}^N S_{0j}^* \sum_{k=1}^N W_{jk} U_{kl},$$

где

$$Y_{jl} = \sum_{k=1}^N W_{jk} U_{kl}.$$

При априорной неопределенности корреляционных характеристик помехи элементы обратной корреляционной матрицы W_{jk} в соответствии с адаптивным байесовским подходом заменяются их оценочными значениями \hat{W}_{jk} [8], а величины Y_{jl} вычисляются в адаптивном матричном фильтре. На практике используются векторные адаптивные режекторные фильтры [9, 10].

Построение цифровых алгоритмов и устройств измерения зависит от выбора интервала временной дискретизации. Широкое распространение из-за ограниченного быстродействия цифровых устройств получил выбор интервала дискретизации τ_d из условия сохранения разрешающей способности по дальности – примерно равным длительности простого (сжатого) сигнального импульса τ_n . При этом временное положение τ оценивается по номеру интервала дискретизации, в котором произошло обнаружение цели. Так как истинное значение τ в пределах интервала $\tau_d \cong \tau_n$ является равновероятным, то независимо от величины сигнальных импульсов дисперсия оценки $\sigma_{\hat{\tau}}^2 = \tau_n^2 / 12$, а среднеквадратичная ошибка оценивания временного положения

$$\sigma_{\hat{\tau}} = \tau_n / 2\sqrt{3}. \quad (7)$$

Рассмотренной межпериодной обработке предшествует внутрпериодная обработка в виде цифровой согласованной фильтрации сложных (широкополосных) сигналов, для эффективного сжатия которых требуется более высокий (в 2...3 раза) темп временной дискретизации [5], что позволяет достигнуть быстродействия современных цифровых устройств, открывающих возможности для высокоточного измерения, не лимитированного условиями выбора интервала

временной дискретизации. Выбор интервала дискретизации $\tau_d < \tau_n$ приводит к эффекту «дробления» отраженных сигнальных импульсов по смежным интервалам дискретизации, что предполагает использование предлагаемых алгоритмов оценивания.

Весовая функция $v(t - \tau)$ теперь также представляется последовательностью цифровых отсчетов v_{l-p} . При переходе от интегрирования к весовому скользящему суммированию выходных отсчетов системы межпериодной обработки X_l цифровой эквивалент алгоритма (6) с учетом $T = \tau_n$ и $\tau_n / \tau_d = m$ принимает вид

$$\xi_l = \left| \sum_{p=1}^m v_p X_{l-p} \right| = \sqrt{\left(\sum_{p=1}^m v_p \operatorname{Re} X_{l-p} \right)^2 + \left(\sum_{p=1}^m v_p \operatorname{Im} X_{l-p} \right)^2} \quad (8)$$

Измерение временного положения сводится к отсчету номера интервала дискретизации l , при котором величина ξ_l максимальна. При этом сохраняется проблема ошибочных отсчетов по остаткам помехи, для решения которой необходимо использовать алгоритмы совместного обнаружения-измерения. Обнаружение сигнала в данном случае осуществляется по результатам сравнения величин $|X_l|$ с пороговыми уровнями обнаружения [10].

Структурная схема цифрового измерителя

Структурная схема цифрового измерителя временного положения приведена на рисунке, где СМО – система межпериодной обработки, вычисляющая отсчеты X_l , поступающие для дальнейшей обработки при условии обнаружения сигнала; ВБ – весовые блоки, осуществляющие весовое скользящее суммирование выходных отсчетов СМО; ВМ – вычислитель модуля весовой суммы, реализующий алгоритм (8); РБ – решающий блок, фиксирующий интервал дискретизации, в котором величина ξ_l максимальна; СС – схема совпадений; ГИД – генератор импульсов дискретизации, следующих с интервалом τ_d ; Сч – счетчик; ИС – импульс синхронизации.

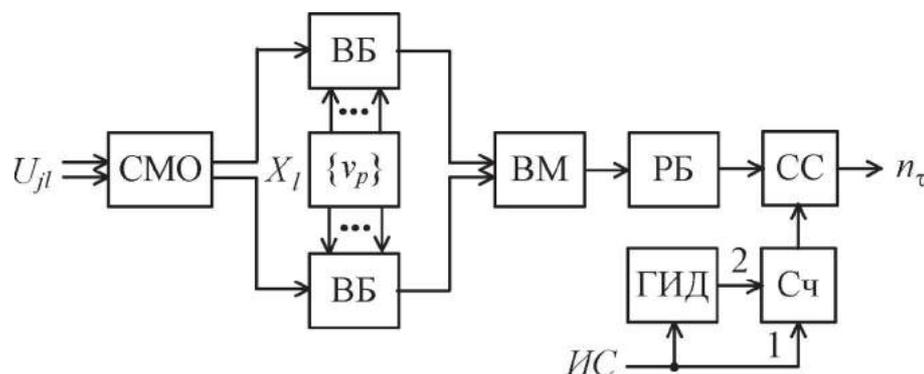


Рис. Структурная схема цифрового измерителя

Автосъем искомого временного положения осуществляется следующим образом. Очередной импульс синхронизации (ИС) радиолокатора, поступающий одновременно с излучением зондирующего сигнала, производит сброс показаний счетчика Сч (вход 1) и синхронизирует генератор импульсов дискретизации ГИД, импульсы которого поступают на счетный вход 2 счетчика Сч. Считанные импульсом решающего блока РБ с помощью схемы совпадений СС показания счетчика Сч n_τ соответствуют интервалу дискретизации, в котором величина ξ_l максимальна. По двоичному коду n_τ определяются оценки временного положения $\hat{t} = n_\tau \tau_d$ и дальности цели

$$\hat{R}_ц = c \hat{t} / 2 = c n_\tau \tau_d / 2,$$

где c – скорость распространения радиоволн.

Так измеряется дальность любого числа разрешаемых по дальности целей. При этом среднеквадратичная ошибка оценивания временного положения при выборе $m = \tau_n / \tau_d > 1$ в результате весового суммирования отсчетов по алгоритму (8) уменьшается по сравнению с величиной, определяемой формулой (7), что предполагает проведение последующих исследований.

Заключение

Таким образом, синтезированный алгоритм оценивания и соответствующий ему цифровой измеритель временного положения последовательности когерентных импульсов осуществляют весовое интегрирование или суммирование результатов межпериодной обработки поступающих данных, что позволяет реализовать потенциальную точность оценивания временного положения этой последовательности. Цифровые эквиваленты синтезированных алгоритмов приводят к структуре цифрового измерителя, позволяющего при соответствующем выборе интервала дискретизации повысить точность оценивания временного положения по сравнению с традиционными алгоритмами.

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. Скольника; пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
3. Richards, M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition / M.A. Richards. – New York : McGraw–Hill Education, 2014. – 618 p.
4. Попов, Д. И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие / Д.И. Попов. – Рязань: РГРТУ, 2011. – 80 с.
5. Кузьмин, С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – Киев: КВиЦ, 2000. – 428 с.
6. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 2 / В.И. Меркулов [и др.]. – М.: Радиотехника, 2007. – 304 с.
7. Кендалл, М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
8. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – М.: Сов. радио. 1977. – 432 с.
9. Попов, Д. И. Адаптивное подавление пассивных помех / Д.И. Попов // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 4. – С. 32–37.
10. Попов, Д. И. Адаптивная обработка когерентных сигналов на фоне помех / Д.И. Попов // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 25–30.

Постановка задачи нахождения оптимальных цифровых порогов обработки сигналов кадровой синхронизации в подсистеме кадровой синхронизации сети радиосвязи с подвижными объектами в условиях помех

Scenario of finding optimal digital thresholds for processing of frame synchronization signals in a frame synchronization subsystem of a radio network with mobile objects underinterference conditions

Смирнов / Smirnov D.

Дмитрий Вячеславович
(dv_smr@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.
МОУ «Институт инженерной физики»,
генеральный директор – первый вице-президент.
Московская обл., г. Серпухов

Бекренев / Bekrenev S.

Сергей Александрович
(bekerel@mail.ru)

МОУ «Институт инженерной физики»,
научный сотрудник.
Московская обл., г. Серпухов

Чайков / Chaikov S.

Сергей Сергеевич
(ss_chay@mail.ru)

кандидат технических наук.
Филиал ФГКВООУ ВО «Военная академия РВСН
имени Петра Великого» МО РФ в г. Серпухове,
заместитель начальника кафедры.
Московская обл., г. Серпухов

Ключевые слова: кадровая синхронизация – frame synchronization; цифровые пороги – digital thresholds; оптимизация – optimization.

В статье представлены особенности построения сети радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами и ее подсистемы кадровой синхронизации. Показано влияние структуры сигнала кадровой синхронизации и цифровых порогов на вероятностные характеристики процесса обработки данных сигналов. Обоснована необходимость применения сигналов кадровой синхронизации сложной структуры. Представлена математическая постановка задачи нахождения оптимальных цифровых порогов обработки сигнала кадровой синхронизации сложной структуры.

The article covers details related to the design of VHF-band radio network with mobile objects and its frame synchronization subsystem. Effect of frame synchronization signal structure and digital thresholds on probability characteristics of signal data processing has been demonstrated. The necessity for use of complex frame synchronization signals has been substantiated. Scenario of finding optimal digital thresholds for processing of complex frame synchronization signals has been presented.

Современные системы радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами востребованы и применяются в различных коммерческих, промышленных и государственных организациях, где необходимо оперативно организовать радиосвязь между подвижными и временными стационарными объектами. Применение систем такого типа планируется для обеспечения связью основных абонентов сети при решении ими ряда задач временного характера на ограниченном участке территории ($\approx 150 \times 150$ км), в тех районах и ситуациях, где монтаж стационарной инфраструктуры связи экономически невыгоден, не обоснован или невозможен [2].

Структура рассматриваемой сети является иерархической и имеет топологию, представленную на рис. 1. В частности, показано наличие в структуре верхнего звена управления (ВЗУ), средних звеньев управления (СЗУ), нижних (исполнительных) звеньев управления (НЗУ), (1+1) уровень иерархии и норма управляемости k .

Каналы связи такой сети являются цифровыми радиоканалами, обеспечивающими скорость передачи информации до 16 кбит/с. В каждом таком канале, с помощью процедуры временного разделения каналов [2,3], организуются менее скоростные цифровые каналы передачи информации со скоростями 1,2–2,4 кбит/с. Для обеспечения устойчивого функционирования представленных каналов сети в типовых сегментах сети необходимо обеспечить установление и поддержание

кадрового синхронизма между узлами коммутации (УК) в каждом типовом сегменте (ТС). Для решения данной задачи в сети функционирует подсистема кадровой синхронизации (ПКС), ее элементы размещаются во всех УК сети. Структура ПКС также является иерархической, сигналы кадровой синхронизации (СКС) передаются с верхних УК на нижние УК. Необходимо отметить, что процедура установления и поддержания кадрового синхронизма в каждом ТС осуществляется независимо от аналогичных процедур в других ТС сети. С учетом сказанного выше, можно утверждать, что установление в сети кадрового синхронизма обусловлено установлением кадрового синхронизма во всех ТС сети в целом и вероятность установления в сети кадрового синхронизма можно найти по формуле (1) при ограничении, что все ТС одинаковые и моменты времени установления кадрового синхронизма во всех ТС совпадают [1]:

$$P_{\text{уст кс}}^{\text{сети}} = \left(P_{\text{уст кс}}^{\text{ТС}} \right)^{N^{\text{ТС}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{уст кс}}^{\text{ТС}}$ – вероятность установления кадрового синхронизма в ТС сети;

$$N^{\text{ТС}} = \sum_{i=0}^l k^i \text{ – число ТС в сети.}$$

Для того чтобы найти вероятность установления кадрового синхронизма в ТС (2), необходимо рассмотреть особенности структуры СКС и физику процесса его обработки в каждом нижестоящем УК ТС [2,3]:

$$P_{\text{уст кс}}^{\text{ТС}} = \left(P_{\text{уст кс}}^{\text{п/н}} \right)^k. \quad (2)$$

Базовым является СКС, представляющий собой

псевдослучайную двоичную последовательность (ПСП) фиксированной длины ($L_{\text{скс}} = L_{\text{псп}}$). Вероятность установления кадрового синхронизма в системе "точка-точка" с помощью такого СКС будет равна вероятности его правильного приема в ПКС УК, с учетом установленного порога $\Pi_{\text{скс}}$ (3).

$$P_{\text{пр псп}} = P_{\text{уст кс}}^{\text{п/н}} = \sum_{i=\Pi_{\text{псп}}}^{L_{\text{псп}}} C_i^{L_{\text{псп}}} (1-p_0)^i (p_0)^{L_{\text{псп}}-i}, \quad (3)$$

где p_0 – вероятность ошибки (искажения) одного двоичного символа;

$\Pi_{\text{псп}} = \Pi_{\text{скс}}$ – цифровой порог обнаружения ПСП.

Однако при ведении информационного обмена в системе "точка-точка" возможно ложное формирование СКС. Данное событие является крайне вредным, и его вероятность на длительности суперкадра ($T_{\text{ск}}$), при допущении о равновероятном появлении на входе цифрового приемника СКС символов "0" и "1", можно найти по формуле:

$$P_{\text{лс}}^{\text{п/н}} = 1 - (1 - (0,5)^{\Pi_{\text{скс}}})^{N_{\text{попытк}}}, \quad (4)$$

$$N_{\text{попытк}} = \left\lfloor \frac{T_{\text{ск}}}{\tau_{\text{дв.с}}} \right\rfloor - \Pi_{\text{псп}}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{дв.с}}$ – длительность одного двоичного символа [с];
 $T_{\text{ск}}$ – период передачи СКС (период суперкадра) [с];
 $\lfloor \rfloor$ – оператор выделения целой части числа.

В зоне функционирования рассматриваемой сети предполагается наличие злоумышленника, который имеет задачу перехвата и распознавания СКС с целью его имитации для нарушения работы ПКС сети и орга-

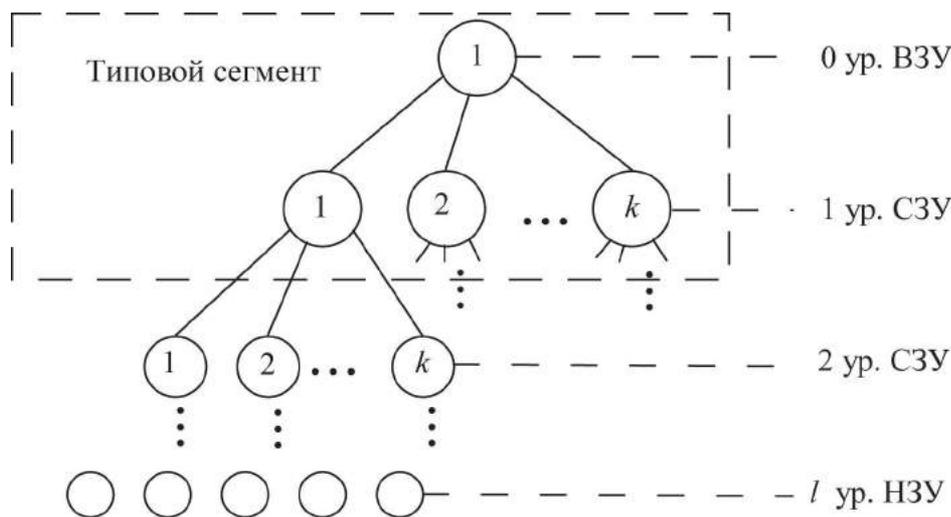


Рис. 1. Топология радиосети иерархической структуры

низации перерывов информационного обмена между УК ТС сети. Событие, заключающееся в установлении ложного кадрового синхронизма в радионаправлении "точка-точка" по причине передачи злоумышленником ложного СКС (ЛСКС), является сложным и характеризуется вероятностью постановки имитационной помехи, которая может быть найдена по формуле

$$P_{\text{ппп}} = P_{\text{расп.скс}} \cdot P_{\text{дов.лскс}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{расп.скс}}$ – вероятность правильного распознавания злоумышленником СКС (согласно алгоритма распознавания);

$P_{\text{дов.лскс}}$ – вероятность правильного приема ЛСКС в ПКС УК, вычисляется по формуле (3) при условии ($L_{\text{лскс}} = L_{\text{псп}}$ и p_0 для ЛСКС и СКС одинакова).

Для нахождения $P_{\text{расп.скс}}$ положим, что для верного распознавания ПСП злоумышленнику необходимо без искажения принять $2n$ (n – степень образующего полинома) или более символов ПСП подряд. Тогда $P_{\text{расп.скс}}$, учитывая, что на $T_{\text{ск}}$ СКС передается один раз, можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{расп.скс}} = \sum_{i=0}^{2^n-2n} \binom{2^n-i}{n} \cdot (1-p_0)^i \cdot (p_0)^{L_{\text{скс}}-i}, \quad (7)$$

где $b = 2n + i$ – размер блока – число двоичных символов.

Проведенные ранее исследования показали, что увеличение $L_{\text{скс}} = L_{\text{псп}}$ при максимальном пороге его обработки приводит к уменьшению $P_{\text{пр псп}}$, уменьшению $P_{\text{лс}}^{p/n}$ и увеличению $P_{\text{ппп}}$. Уменьшая порог обработки СКС ($\Pi_{\text{скс}}$), можно добиться $P_{\text{пр псп}} \geq P^{np}$, однако значения $P_{\text{лс}}^{p/n}$ и $P_{\text{ппп}}$ при этом примут значения намного выше требуемых, что недопустимо (таблица 1).

Для снижения $P_{\text{лс}}^{p/n}$ и $P_{\text{ппп}}$ (причем данный способ нацелен больше снизить $P_{\text{ппп}}$) предлагается использовать СКС сложной структуры (рис. 2).

Логично предполагать, что злоумышленнику будет сложнее распознать СКС такой структуры, что приведет к уменьшению компонентов формулы (6), а, следовательно, и к снижению $P_{\text{ппп}}$.

Тогда $P_{\text{расп.скс}}$ и $P_{\text{дов.лскс}}$, с учетом физики процесса обработки СКС сложной структуры злоумышленником и своим приемником, надо рассчитывать по формулам (8) и (9) соответственно. Как и в первом случае на вероятностные характеристики процесса обработки СКС сложной структуры существенное влияние оказывают цифровые пороги ($\Pi_{\text{скс}}$ и $\Pi_{\text{псп}}$). Очевидно, что существуют их оптимальные значения, определяемые по критерию Неймана-Пирсона [4], – максимум $P_{\text{пр скс}}$ при ограничениях на $P_{\text{лс}}^{p/n}$ и $P_{\text{ппп}}$ (10) или по критерию мини-

Таблица 1

Результаты расчетов при $p_0 = 0,01$

	$p_0 = 0,01$	$\Pi_{\text{скс}}$		
		$L_{\text{скс}}$	$L_{\text{скс}}-1$	$L_{\text{скс}}-2$
$P_{\text{лс}}$	32	$0,23 \cdot 10^{-9}$	$0,777 \cdot 10^{-8}$	$0,123 \cdot 10^{-6}$
$P_{\text{пр псп}}$	32	0,72	0,959	0,996
$P_{\text{ппп}}$	32	0,54	0,72	0,74
$P_{\text{лс}}$	64	$0,54 \cdot 10^{-19}$	$0,35 \cdot 10^{-17}$	$0,113 \cdot 10^{-15}$
$P_{\text{пр псп}}$	64	0,53	0,865	0,93
$P_{\text{ппп}}$	64	0,29	0,47	0,5
$P_{\text{лс}}$	128	$0,29 \cdot 10^{-38}$	$0,38 \cdot 10^{-36}$	$0,24 \cdot 10^{-34}$
$P_{\text{пр псп}}$	128	0,28	0,63	0,863
$P_{\text{ппп}}$	128	0,08	0,18	0,25

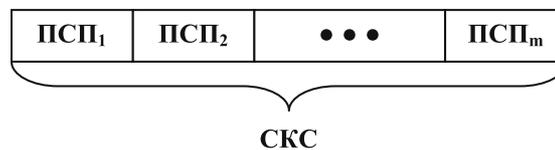


Рис. 2. СКС сложной структуры

мума $P_{\text{ппп}}$ при обеспечении заданного уровня $P_{\text{пр скс}}$ и ограничениях на $P_{\text{лс}}^{p/n}$ (11):

$$P_{\text{пр скс}} = f(p_0, \Pi_{\text{скс}}^*, \{ \Pi_{1\text{псп}}^*, \Pi_{2\text{псп}}^*, \dots, \Pi_{m\text{псп}}^* \}, n, m) \rightarrow \max$$

при $\begin{matrix} P_{\text{лс}}^{p/n} \leq P_{\text{лс}}^{p/n \text{ треб}} \\ P_{\text{ппп}} \leq P_{\text{ппп}}^{\text{треб}} \end{matrix}$

(10)

$$P_{\text{пр скс}} = f(p_0, \Pi_{\text{скс}}^*, \{ \Pi_{1\text{псп}}^*, \Pi_{2\text{псп}}^*, \dots, \Pi_{m\text{псп}}^* \}, n, m) \rightarrow \min$$

при $\begin{matrix} P_{\text{лс}}^{p/n} \leq P_{\text{лс}}^{p/n \text{ треб}} \\ P_{\text{ппп}} \geq P_{\text{ппп}}^{\text{треб}} \end{matrix}$

(11)

Решение задач (10) и (11) позволит получить два множества оптимальных значений цифровых порогов для реализации в приемной аппаратуре двух соответствующих режимов работы ПКС.

Литература

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: Учебник для студ. вузов / Е.С. Вентцель – 10-е изд., стер. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 576 с.
2. Чайков, С. С. Нахождение оптимальных параметров подсистемы кадровой синхронизации с временным разделением каналов и ШПС-ФМ синхросигналами в сети радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами / С.С. Чайков, Д.В. Смирнов, С.А. Бекренев // Известия Ин-та инженерной физики. – 2015. – № 4. – С. 36–40.
3. Смирнов, Д. В. Формализация задачи определения оптимальных параметров подсистемы кадровой синхронизации при реализации временного разделения каналов в сети радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами для сигналов кадровой синхронизации сложной структуры / Д.В. Смирнов, С.С. Чайков, С.А. Бекренев // Междун. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS-2016); Доклады; Серия: науч. конф. посвящ. Дню радио / Рос. науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. – М.: ООО «БРИС-М», 2016. – Вып. LXXI. – С. 490–492.
4. Буга, Н. Н. Основы теории связи и передачи данных / Н.Н. Буга. – Ленинград.: Типография ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, 1968. – 548 с.

Формализованный подход к применению метода наложения для принятия решения на модернизацию и развитие транспортных сетей связи

Formalized approach to application of overlay method for making decision regarding upgrade and development of transport communication networks

Сторожук / Storozhuk N.

Николай Леонидович

(snl@loniis.ru)

кандидат технических наук.

Филиал ФГУП «Ленинградское

отделение центрального научно-исследовательского института связи» (ЛО ЦНИИС),

и.о.директора филиала.

г. Санкт-Петербург

Ясинский / Yasinsky S.

Сергей Александрович

(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.

ЛО ЦНИИС,

научный консультант.

г. Санкт-Петербург

Зюзин / Zyuzin A.

Александр Николаевич

(alexz01@bk.ru)

кандидат технических наук.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного», преподаватель.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть связи – transport communication network; метод наложения – overlay method; спектральное уплотнение каналов – wavelength-division multiplexing; минимальное взвешенное покрытие – minimum weighted coverage.

В статье описывается формализованный подход к применению метода наложения для модернизации фрагмента транспортной сети связи средствами технологии Wavelength-division multiplexing (WDM) – спектрального уплотнения каналов. Предлагается разделить процесс на три этапа. На первом этапе определить топологию модернизируемых линий связи, решив задачу на минимальном взвешенном покрытии. На втором – рассчитать необходимое количество спектральных каналов для каждой линии связи. На третьем этапе произвести энергетический расчет каждой модернизируемой линии связи с учетом текущих характеристик кабельно-линейных сооружений и параметров устанавливаемого оборудования.

The article describes a formalized approach to application of overlay method for upgrade of transport communication subnetwork using Wavelength-division multiplexing (WDM) technology. The process is suggested to be divided into three stages. At the first stage topology of upgradable communication lines shall be determined after solving the problem using minimum weighted coverage. At the second stage the required number of spectral channels for each communication line shall be calculated. At the third stage energy calculation shall be made for each upgradable communication line based on current characteristics of cable and line infrastructure and parameters of the equipment to be installed.

Правительство Российской Федерации утвердило систему реализации программы цифровой экономики в стране, целью которой является формирование полноценной цифровой среды. По мнению властей, именно «цифровизация» экономики позволит России решить вопрос глобальной конкурентоспособности и национальной безопасности, а также будет способствовать практической реализации наиболее приоритетных направлений развития нашей страны [1]. 18 декабря 2017г. правительственной комиссией по использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности утвержден план мероприятий по направлению «Информационная инфраструктура» программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [2]. В рамках плана мероприятий разработана Генеральная схема развития сетей связи Российской Федерации на период 2018–2024 годов. Реализации данной программы потребует существенного увеличения пропускной способности линий связи, но при этом должны учитываться особенности модернизации и развития транспортной составляющей сетей связи, то есть транспортных или первичных сетей связи, которые определяют потенциальные и реально достижимые показатели функционирования телекоммуникационных сетей [3].

Для принятия решения на модернизацию и развитие транспортных сетей (ТрС) Единой Сети Электросвязи (ЕСЭ) РФ важно учитывать ее консервативность, которая заключается в высокой стоимости развертывания и,

следовательно, в длительном времени функционирования, в течение которого сменяются несколько поколений информационных сервисов и систем ЕСЭ РФ.

Рациональное развитие ТрС ЕСЭ РФ должно производиться на этапах ее реконструкции и последующего строительства, которое в общем случае может осуществляться в двух основных направлениях:

- модернизации и развития участков существующих сетей;
- построения новых участков сети.

Как показывает мировой опыт, при модернизации существующих участков первичных сетей и ТрС ЕСЭ РФ может быть использовано сочетание методов замещения и наложения [3, 4, 5].

Метод замещения заключается в постепенной замене устаревшего оборудования ТрС ЕСЭ РФ за счет реконструкции волоконно-оптических, кабельных, радиорелейных и тропосферных линий передачи. Это эволюционно-длительный процесс, который зависит как от наличия инвестиционных возможностей операторов связи, так и от текущих потребностей пользователей в услугах связи.

Метод наложения обеспечивает модернизацию ТрС ЕСЭ РФ путем построения цифровой сети нового поколения, функционирующей параллельно существующей. Этот процесс может проходить поэтапно на выбранных участках сети и не влияет на работу существующего оборудования.

Для обеспечения требуемой связности и разветвленности наложенной цифровой сети ТрС ЕСЭ РФ нового поколения могут:

- использоваться свободные волокна, проложенных ранее волоконно-оптических кабелей;
- задействоваться резервные и свободные стволы радиорелейных систем передачи;
- использоваться технологии спектрального уплотнения каналов (СУК) для существующих волоконно-оптических линий связи (ВОЛС);
- образовываться «пакетные» каналы в групповых каналах и трактах цифровых систем передачи и наоборот.

Наиболее интересным с точки зрения затрат и открывающихся возможностей для метода наложения является использование технологии СУК для ВОЛС. Суть этого подхода заключается в том, что на существующих участках ВОЛС устанавливается необходимое оборудование СУК, которое позволяет передавать высокоскоростные информационные потоки одновременно на нескольких длинах волн оптического диапазона в одном оптическом волокне. Однако на одной из формируемых длин волн продолжает работать система передачи старшего поколения, а на остальных длинах волн можно разворачивать современное оборудование. Соответственно, потенциальная пропускная способность каждого оптического волокна в ВОЛС увеличивается пропорционально количеству сгенерированных длин волн с сохранением существующих систем передачи [3, 4].

Решение задачи модернизации ТрС ЕСЭ РФ методом наложения с использованием технологии СУК на всех участках существующих сетей связи это трудоемкий и финансово не оправданный процесс. Эффективно решить задачу модернизации ТрС ЕСЭ РФ возможно только после оценки планируемых объемов увеличения пропускной способности на приоритетных направлениях связи.

В то же время, важно понимать физические особенности технологии СУК при ее использовании для модернизации существующих ВОЛС, которые заключаются:

- 1) в необходимости увеличения оптического бюджета ВОЛС, который будет использован для обеспечения процессов мультиплексирования и демупльтиплексирования разных длин волн в одном оптическом волокне;
- 2) в необходимости учета дисперсионных характеристик кабеля и мероприятий по компенсации дисперсии с учетом увеличивающихся скоростей передачи;
- 3) в необходимости учета и компенсации нелинейных эффектов многоволнового сигнала в ВОЛС, вызывающего перекрестные помехи: четырехволновое смешение (*FWM – Four Wave Mixing*) и перекрестную фазовую модуляцию (*XPM – Cross Phase Modulation*).

Следовательно, перед принятием решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием СУК необходимо учитывать не только требования по обеспечению переноса информационных потоков, но и реальные характеристики существующих ВОЛС.

Учитывая рассмотренные особенности целесообразно разделять процесс принятия решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием технологии СУК на три этапа.

1. На первом этапе выделять наиболее важные с точки зрения пропускной способности линии связи участки ТрС между корреспондирующими парами узлов (КПУ), которые будут планироваться для модернизации.

2. На втором этапе, исходя из планируемых потребностей в пропускной способности между КПУ, определять количество длин волн (спектральных каналов) и их пропускную способность для каждой модернизируемой линии связи.

3. На третьем этапе проводить проверочные расчеты на возможность установки оборудования СУК для каждой модернизируемой линии связи. В случае отрицательного результата проверочного расчета потребуется производить корректировку перечня модернизируемых линии связи участка ТрС.

Для математической формулировки (формализованной постановки) решаемых задач подобного класса предлагается использовать известные элементы моделирования из теории графов. Структуру фрагмента ТрС смоделируем при помощи ненаправленного графа $G = \{A, B, U, L\}$. В этом графе множество вершин $A = \{a_i; i = 1, N\}$ соответствует множеству узлов фрагмента ТрС с общим числом N , а множество ребер $B = \{b_{ij}; i, j = 1, N; i \neq j\}$ описывает линии пере-

дачи между этими узлами, на котором определены: матрица пропускных способностей (спектральных каналов) $U = \{u_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ и значения длин линий передачи $L = \{l_{ij}; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$. Кроме того, обозначим множество КПУ $Z = \{z_m; m = \overline{1, M}\}$, где M – общее количество КПУ.

Упрощенная блок-схема для принятия решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием технологии СУК представлена на рис. 1.

Для оценки наиболее важных с точки зрения увеличения пропускной способности линии связи между корреспондирующими парами узлов ТрС предлагается использовать известный подход, который формулируется и решается как задача линейного булева программирования – о минимальном взвешенном покрытии множества возможных сечений путей различных направлений связи (КПУ) минимальным количеством ребер сети.

Для формулировки задачи о минимальном взвешенном покрытии необходимо определить множество допустимых сечений между КПУ и представить их матрицей сечений S .

Каждая строка формируемой матрицы S должна соответствовать одному из сечений множества K , а каждый столбец одному из ребер множества B . Элементы матрицы определяются следующим образом:

$$s_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } b_{ij} \text{ ребро принадлежит } k\text{-му сечению } (k = \overline{1, K}); \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

Далее решается задача взвешенного покрытия матрицы S , как оптимизационная задача линейного булева программирования, путем нахождения такого подмножества столбцов (ребер) с минимальной длиной, в котором каждая строка (сечение) содержит единицу хотя бы в одном из выбранных столбцов. За счёт исключения найденного множества ребер из сети покрывается все множество сечений фрагмента ТрС для z_m -ой КПУ.

Для формулировки этой задачи в виде задачи линейного программирования удобно ввести дополнительные булевы переменные:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } b_{ij} \text{ ребро включено во взвешенное покрытие;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

В этом случае задача о минимальном взвешенном покрытии будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \sum_{b_{ij} \in B} l_{ij} w_{ij} &\Rightarrow \min; \\ \sum_{b_{ij} \in B} s_{ij}^k w_{ij} &\geq 1; \quad k = \overline{1, K}; \\ s_{ij}^k &\in \{0, 1\}, \quad w_{ij} \in \{0, 1\}. \end{aligned}$$

Найденные ребра сети, с точки зрения оптимального выбора, должны иметь наименьшую протяженность и покрывать наибольшее количество найденных сечений, что приводит к определению топологии модернизируемых линий связи ТрС средствами технологии СУК.

Для оценки условий физической реализуемости технологии СУК на выбранных линиях связи (ребрах сети) требуется уточнить количество и пропускную способность длин волн (спектральных каналов) для каждой из них – определить потоковую структуру модернизируемых линий связи средствами технологии СУК.

Для этого необходимо учитывать номенклатуру и количество существующих и вновь образуемых каналов и трактов различного типа между КПУ. Искомая потоковая структура должна удовлетворять потребности в передаче потоков между КПУ:

$$\begin{aligned} \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} x_{z_m}^{\lambda} &\geq V_{z_m}, \quad m = \overline{1, M}; \\ \sum_{m=1}^M \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} b_{ij}^{\lambda} x_{z_m}^{\lambda} &\leq u_{ij}; \\ x_{z_m}^{\lambda} &\geq 1, \quad m = \overline{1, M}, \end{aligned}$$

где Λ – количество длин волн для z_m -ой КПУ; $x_{z_m}^{\lambda}$ – мощность потока, направляемого по λ -ой длине волны;

$$b_{ij}^{\lambda} = \begin{cases} 1, & \text{если } \lambda \text{ длина волны проходит через } b_{ij}; \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

V_{z_m} – требуемая мощность потока z_m -ой КПУ.

Далее решается задача рационального выбора маршрутов (путей) и назначения длин волн (*Routing and Wavelength Assignment*). Эта задача состоит в выборе оптимального маршрута между КПУ и назначения длин волн исходя из приоритетных условий: минимального расстояния, минимального количества промежуточных узлов, наличия свободных длин волн на участке и минимального количества преобразований длин волн на маршруте [6, 7]. Сложность решения подобного класса задачи на рассматриваемом этапе модернизации ТрС будет минимальной по причине минимизации количества модернизируемых линий. Однако при расширении фрагмента ТрС с СУК и использовании устройств для конвертирования длин волн (кросспондеры, мукспондеры, транспондеры и др.) задача рационального выбора маршрутов (путей) и назначения длин волн будет усложняться.

Результатом определения количества и пропускной способности длин волн должна быть получена уточненная матрица пропускных способностей $U = \{u_{ij}^{\lambda}\}$, выбранных для модернизации линий связи.

После решения задачи рационального выбора маршрутов (путей) и назначения длин волн проводится проверочный расчет на возможность установки оборудо-

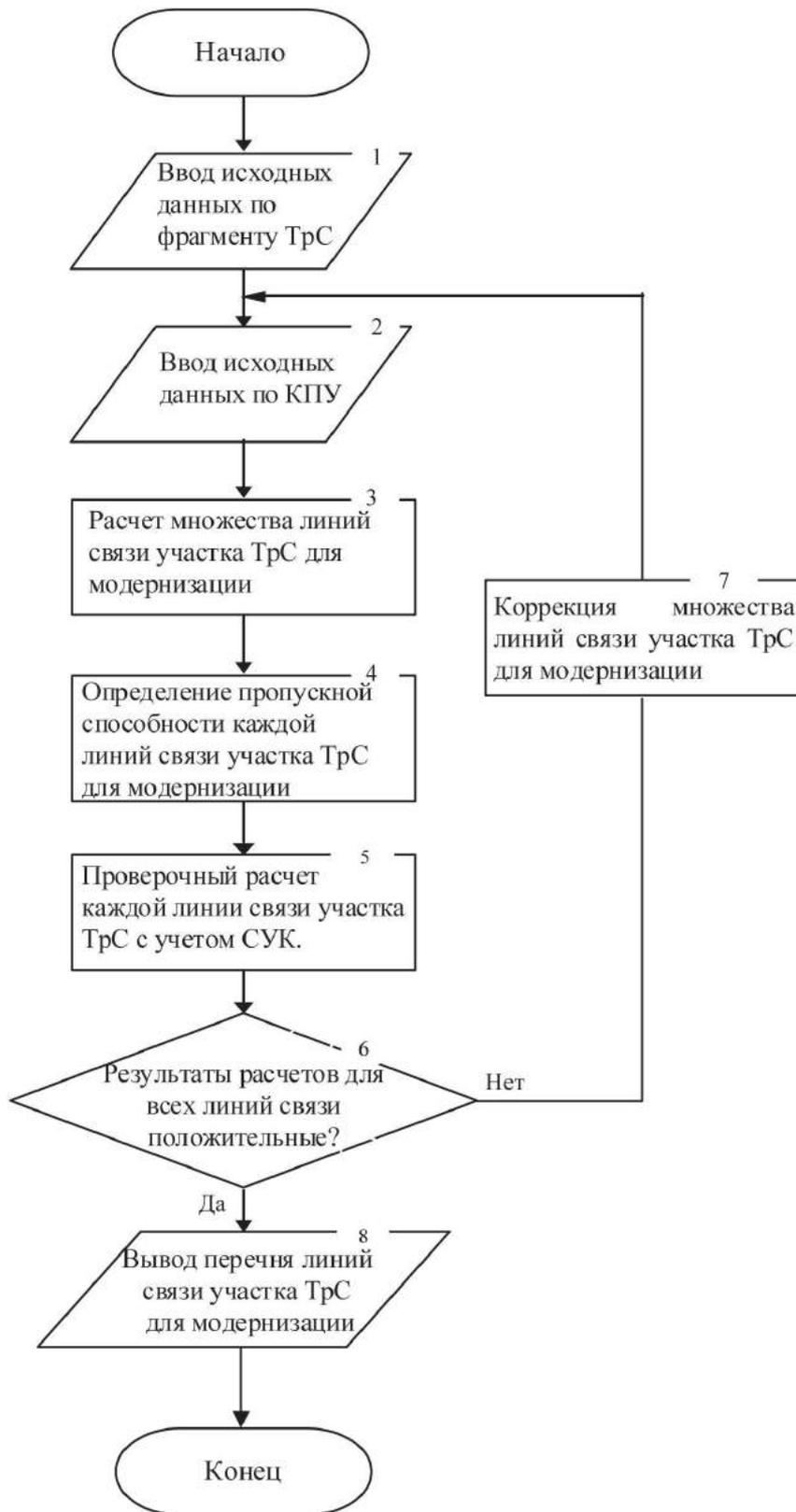


Рис. 1. Блок-схема принятия решения на модернизацию участка ТрС методом наложения с использованием технологии СУК

вания СУК для каждой модернизируемой линии связи исходя из характеристик имеющегося волоконно-оптического линейного тракта и выбранного оборудования систем передачи СУК с его индивидуальными особенностями (мощности излучателей, чувствительности приемников, шумовых характеристик и т.д.), использования, если это необходимо, дополнительных оптических усилителей, устройств компенсации дисперсии и др. Для проверочного расчета бюджета мощности модернизируемых линий связи можно использовать известные методики и расчетные модули, предоставляемые производителями оборудования [8, 9, 10].

Таким образом, в результате использования приведенного в настоящей статье формализованного подхода к применению метода наложения для принятия решения на модернизацию и развитие транспортных сетей связи формируется структура линейного тракта для каждой модернизируемой линии передачи ТрС с СУК. В случае получения отрицательного результата при проверочном расчете выбранная линия связи исключается из дальнейшего рассмотрения, а расчет повторяется с начала (рис.1.). Перед окончательным принятием решения на модернизацию линий связи необходимо провести все необходимые измерения и соответствующие проектно-изыскательские работы для учета конкретных эксплуатационных показателей линий связи (оптические длины однородных участков, реальные потери оптической мощности на сростках, вставках, соединениях, возможности по размещению и электропитанию оборудования и т.д.).

Предложенный подход позволяет: оптимально с точки зрения необходимых направлений связи производить наращивание пропускных способностей на ТрС ЕСЭ РФ с минимальными затратами на кабельно-линейные сооружения; модернизировать фрагменты ТрС ЕСЭ РФ поэтапно, в зависимости от ближайших прогнозируемых потребностей и оперативно наращивать пропускную способность ТрС ЕСЭ РФ на требуемых участках развиваемой транспортной сети связи.

Литература

1. Распоряжение от 28 июля 2017 года №1632-р. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://government.ru/docs/28653/>, свободный. – Загл. с экрана.
2. ПРИЛОЖЕНИЕ № 3 к протоколу заседания Правительственной комиссии по использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 18 декабря 2017 г. № 2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/DAMotdOImu8U89bhM7lZ8Fs23msHtcim.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Грязев, А. Н. Методы развития транспортных сетей связи для цифровой экономики РФ / А.Н. Грязев, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Вестник связи. – 2018. – № 2. – С. 19–22.
4. Грязев, А. Н. Многослойная графовая модель для модернизации и развития транспортных сетей связи /

А.Н. Грязев, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Вестник связи. – 2018. – № 5. – С. 13–16.

5. Рунеев, А. Ю. Концепция ТСС. Первичные сети связи. Концепция создания и развития первичной сети территориальной системы связи / А.Ю. Рунеев, Н.А. Зюзин // Телекоммуникационные технологии. – 2001. – Вып. 1. – С. 3–13.

6. Подход к выбору маршрутов и назначению длин волн в транспортных сетях со спектральным уплотнением на основе волнового алгоритма / В.В. Ефимов [и др.] // Электросвязь. – 2017. – № 7. – С. 28–30.

7. Алгоритм выбора маршрутов и назначения длин волн в транспортных сетях связи со спектральным уплотнением / К.В. Лыжинкин [и др.] // ТРУДЫ ЦНИИИС. Санкт-Петербургский филиал. – 2017. – Т. 1 (4). – С. 159–165.

8. Спектральное уплотнение wdm уровня stm-64 (10g) от Натекс. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/publication/spektralnoe-uplotnenie-wdm-urovnya-stm-64-10g-ot>, свободный. – Загл. с экрана.

9. Калькулятор оптического бюджета. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.prointech.ru/kb/opticheskij-byudzheta/kalkulyator-opticheskogo-byudzheta.html>, свободный. – Загл. с экрана.

10. Link Loss Budget Worksheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/resources/system-design-calculators/link-loss-budget-calculator.html>, свободный. – Загл. с экрана.

Обобщенная модель сигнального процесса Haptic-кодека на базе быстроходимых полиномов

Generalized model of Haptic codec signaling process based on rapidly-convergent polynomials

Владимиров / Vladimirov S.

Сергей Александрович

(vlsa.vlcom@yandex.ru)

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ), старший преподаватель кафедры «Сетей связи и передачи данных».
г. Санкт-Петербург

Владимиров / Vladimirov S.

Сергей Сергеевич

(vladimirov.opds@gmail.com)

кандидат технических наук, доцент.

СПбГУТ,

доцент кафедры «Сетей связи и передачи данных».

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: тактильный Интернет – Tactile Internet; Haptic-кодек – Haptic codec; параметрическое регулирование – parametric control; аппроксимационная обработка сигналов – approximating processing of signals.

Произведена постановка задачи Haptic-кодека, как взаимосвязанной параметрической системы регулирования, и приведена структура обобщенной модели сигнального процесса Haptic-кодека. Рассмотрено формальное разбиение полной системы элементов управления для кодека на подсистемы, для каждой из которых определена передаточная функция сигнального параметра. Предложена общая идея процедуры аппроксимационной обработки сигналов Haptic-кодека для одного параметра.

Scenario of Haptic codec as an interconnected parametric control system and structure of the generalized model of Haptic codec signaling process have been presented. Formal splitting of all codec controls into subsystems has been reviewed; transfer function of signal parameter has been defined for each subsystem. General idea of Haptic codec signals approximation processing for a single parameter has been offered.

постановке задачи проектирования Haptic-кодека, стала задача разработки универсального самообучающегося механизма, который должен по известным начальным или определенным в заданном диапазоне входным и выходным значениям, заранее или в ходе работы, вычислить передаточную функцию системы для используемых сигналов или параметров. В дальнейшем вычисленная передаточная функция будет использоваться для аппроксимации и определения значений уровня сигналов в целях компенсации значимых для тактильности задержек [3], обеспечения плавности регулировок и других рассмотренных и рассматриваемых в будущем задач в рамках ТИ [3–7].

Предлагаемую модель сигнального процесса авторы рассматривают в рамках нормальной эксплуатации системы управления, не затрагивая вопросы внесения преднамеренной помехи. Отметим сразу, что вопросы синхронизации, как и некоторые другие, достаточно важные и необходимые для обеспечения работы кодека функции, выходят за рамки предлагаемой модели и будут рассматриваться в ходе проработки отдельно в рамках полного аналитического и практического исследования.

Haptic-кодек, как параметрическая система регулирования

Выполним общую постановку задачи Haptic-кодека как взаимосвязанной системы. Представим Haptic-кодек в виде параметрической системы регулирования, в которой множество воздействий на систему и соответствующих откликов на эти воздействия рассматриваются как общий набор параметров. Функционально параметрическая система, в соответствии с общей структурой системы ТИ [1–5], разбивается на 2 части – объект и оператор. Следовательно, в общем наборе параметров, с учетом их дополнительного разде-

Введение

В структуре Тактильного Интернета (ТИ) Haptic-кодек является системой, предназначенной для формирования, обработки и представления в необходимом формате динамически изменяющихся сигналов дистанционного управления и положения объекта, связанных с сигналами тактильности на сторонах оператора и объекта [1–5]. Одной из важных задач, возникших при

ления на входные, с точки зрения системы, воздействия X и выходные воздействия Y и A , можно выделить три основные подгруппы параметров:

1. Параметры X воздействия от оператора.
2. Параметры A воздействия на оператора.
3. Параметры Y воздействия от объекта.

Эти подгруппы образуются сигналами, для которых введем следующие обозначения:

- $x_i(t)$ – сигналы и изменение входных параметров множества X со стороны оператора;
- $x_j(t)$ – дополнительные сигналы множества X со стороны оператора;
- $y_i(t), y_j(t)$ – сигналы и изменение выходных и дополнительных параметров множества Y со стороны объекта;
- $\alpha_i(t)$ – сигналы тактильности и изменение выходных параметров множества A на стороне оператора, и условными, подлежащими аппроксимации функциями:
- F_i – функции, формирующие выходные параметры сигналов $y_i(t)$ со стороны объекта;
- ξ_i – функции, формирующие выходные параметры и сигналы $\alpha_i(t)$ на стороне оператора, как зависимости от изменения выходных $y_i(t)$ и дополнительных $y_j(t)$ параметров сигналов со стороны объекта;
- Φ_i – функции, формирующие выходные параметры и сигналы на стороне оператора $\dot{\alpha}_i(t)$, как зависимости от изменения входных $x_i(t)$ и дополнительных $x_j(t)$ параметров сигналов со стороны оператора.

Упорядочим выражения:

- $x_i(t) = F_i[x_i(t)]$ – выходные сигналы со стороны объекта, как реакция воздействия на объект;
- $\alpha_i(t) = \xi_{ij}[y_{ij}(t)] = \xi_{ij}[y_j(t); F_i[x_i(t)]]$ – сигналы тактильности, как реакция на изменения объектовых сигналов;
- $\dot{\alpha}_i(t) = \Phi_{ij}[x_i(t); x_j(t)]$ – сигналы тактильности, как реакция на изменение входных сигналов.

На рис. 1 представлены введенные обозначения сигналов и функций с учетом их места в системе ТИ при работе Haptic-кодека.

Полная система элементов управления для кодека формально представлена тремя подсистемами:

1. Подсистема формирования выходных параметров дистанционного управления Y .
2. Подсистема формирования выходных параметров тактильности A от выходных параметров объекта Y .
3. Подсистема формирования выходных параметров тактильности A от входных параметров оператора X .

Подсистема формирования выходных сигналов объекта дистанционного управления представляет собой реакцию на входные воздействия сигналов операторской подсистемы и рассматривается как временная функция $y_i(t) = F_i[x_i(t)]$, где F_i определена как передаточная функция изменения входных параметров $x_i(t)$.

Запишем параметрическую передаточную функцию для i параметра непрерывного сигнала, используя преобразование Лапласа [8, 9]

$$F_i(p) = \frac{Y_i(p)}{X_i(p)}$$

где $X_i(p)$ и $Y_i(p)$ — изображения Лапласа для непрерывных входного и выходного сигналов, вычисляемые по формулам

$$X_i(p) = L[X_i(t)] = \int_0^{\infty} x_i(t) e^{-pt} dt,$$

$$Y_i(p) = L[Y_i(t)] = \int_0^{\infty} y_i(t) e^{-pt} dt.$$

Передаточная функция дискретной системы и передаточная функция непрерывной системы связаны соот-

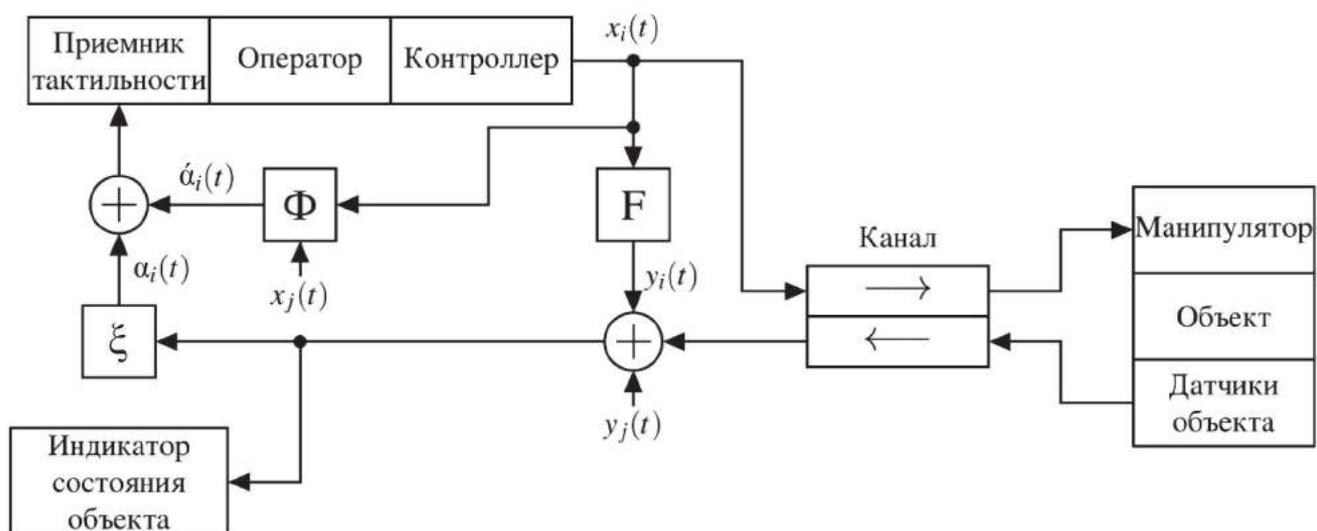


Рис. 1. Обобщенная модель Haptic-кодека как параметрической системы регулирования

ношением $F(z) = \frac{z-1}{z} Z[F(t)]$, или через передаточную функцию непрерывной системы в области изображений Лапласа $F(z) = \frac{z-1}{z} Z\left[\frac{F(p)}{p}\right]$ [9, 10]. Рассматривая в дальнейшем предлагаемую модель, воспользуемся этим и соотношениями при переходе из непрерывной области в область дискретных систем с использованием δ -функции.

В нашем случае, с учетом применения цифровых систем передачи, переведем выражение передаточной функции для i сигнального параметра дистанционного управления в область дискретных сигналов используя Z -преобразования:

$$F_i(z) = \frac{Z[y_i(n)]}{Z[x_i(n)]} = \frac{Y_i(z)}{X_i(z)} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} y_i(k)z^{-k}}{\sum_{k=0}^{\infty} x_i(k)z^{-k}}.$$

Подсистема формирования выходных сигналов тактильности от выходных сигналов объекта является реакцией на изменения выходных и дополнительных параметров сигналов со стороны подсистемы объекта и рассматривается как временная функция $\alpha_i(t) = \xi_{i,j}[y_j(t); y_i(t)]$, где ξ_i определена как передаточная функция изменения выходных параметров $y_i(t)$ и дополнительных параметров $y_j(t)$. По аналогии с предыдущей подсистемой для простого случая функциональной зависимости от одного параметра $\alpha_i(t) = \xi_i[y_i(t)]$ используются следующие формулы:

$$\xi_i(p) = \frac{A_i(p)}{Y_i(p)},$$

$$Y_i(p) = L[Y_i(t)] = \int_0^{\infty} y_i(t) e^{-pt} dt,$$

$$A_i(p) = L[A_i(t)] = \int_0^{\infty} \alpha_i(t) e^{-pt} dt,$$

$$\xi_i(z) = \frac{Z[\alpha_i(n)]}{Z[y_i(n)]} = \frac{A_i(z)}{Y_i(z)} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_i(k)z^{-k}}{\sum_{k=0}^{\infty} y_i(k)z^{-k}}.$$

Далее в области Z -преобразования рассмотрим воздействие дополнительных параметров или сигналов $y_j(t)$ на сигнал тактильности $\alpha_i(t)$. В случае если сигнал $y_j(t)$ влияет на $\alpha_i(t)$, как дополнительное возмущение или помеха сигналу $y_i(t)$, его действие приложено не ко входу $y_i(t)$ и оказывает мультипликативное воздействие, то в этом случае его влияние рассматривается как последовательное звено в обработке $y_i(t)$ и передаточная функция для сигнального параметра кодека представляется в виде

$$\xi_{i,j}(z) = \frac{Z[\alpha_i(n)]}{Z[y_i(n)]Z[y_j(n)]} = \frac{A_i(z)}{Y_i(z)Y_j(z)} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_i(k)z^{-k}}{\sum_{k=0}^{\infty} \prod_{k=0}^{\infty} y_j(k)y_i(k)z^{-k}},$$

с условным пересчетом $y_j(t)$ для входа параметрической системы вычисления $\alpha_i(t)$, как функции $y_i(t)$.

Подсистема формирования выходных сигналов тактильности от входных сигналов оператора представляет собой реакцию на изменения входных и дополнительных параметров сигналов со стороны подсистемы оператора и рассматривается как временная функция $\acute{\alpha}_i(t) = \Phi_i[x_j(t); x_i(t)]$, где Φ_i определена как передаточная функция изменения входных параметров $x_i(t)$ и дополнительных параметров $x_j(t)$. Запишем функции этой подсистемы для случая $\acute{\alpha}_i(t) = \Phi_i[x_i(t)]$:

$$\Phi_i(p) = \frac{A_i(p)}{X_i(p)},$$

$$X_i(p) = L[X_i(t)] = \int_0^{\infty} x_i(t) e^{-pt} dt,$$

$$A_i(p) = L[A_i(t)] = \int_0^{\infty} \alpha_i(t) e^{-pt} dt,$$

$$\Phi_i(z) = \frac{Z[\alpha_i(n)]}{Z[x_i(n)]} = \frac{A_i(z)}{X_i(z)} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_i(k)z^{-k}}{\sum_{k=0}^{\infty} x_i(k)z^{-k}}.$$

Для случая $\acute{\alpha}_i(t) = \Phi_i[x_j(t); x_i(t)]$ передаточная функция равняется

$$\Phi_{i,j}(z) = \frac{Z[\alpha_i(n)]}{Z[x_i(n)]Z[x_j(n)]} = \frac{A_i(z)}{X_i(z)X_j(z)} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_i(k)z^{-k}}{\sum_{k=0}^{\infty} \prod_{k=0}^{\infty} x_j(k)x_i(k)z^{-k}}.$$

Для того чтобы получить общее выражение передаточной функции в полиномиальном виде рассмотрим разностное уравнение для простого случая зависимости от одного параметра для всех трех подсистем. Выходной сигнал i параметра в общем виде для дискретных значений параметров равняется

$$y_i(n) = -\sum_{v=1}^N b_v y_i(n-v) + \sum_{\mu=0}^M a_{\mu} x_i(n-\mu). \quad (1)$$

При рассмотрении этой модели представления сигналов учтем физическую реализуемость системы, что соответствует равенству нулю переходной импульсной характеристики ($h(t) = 0$), при значениях $t < 0$. Следовательно, для общего случая при $t > 0$ с учетом начальных значений перепишем формулу (1) в виде

$$b_0 y_i(0) + b_1 y_i(1) + \dots + b_{N-1} y_i(N-1) + b_N y_i(N) = a_0 x_i(0) + a_1 x_i(1) + \dots + a_{M-1} x_i(M-1) + a_M x_i(M).$$

После Z -преобразования получим:

$$(b_0 + b_1 z + \dots + b_{N-1} z^{N-1} + b_N z^N) Y_i(z) = (a_0 + a_1 z + \dots + a_{M-1} z^{M-1} + a_M z^M) X_i(z).$$

Отсюда передаточная функция равняется:

$$F_i(z) = \frac{Y_i(z)}{X_i(z)} = \frac{(a_0 + a_1z + \dots + a_{M-1}z^{M-1} + a_Mz^M)}{(b_0 + b_1z + \dots + b_{N-1}z^{N-1} + b_Nz^N)} = \frac{\sum_{m=0}^M a_m z^m}{\sum_{n=0}^N b_n z^n}.$$

Введем дополнительное условие для предварительного рассмотрения предлагаемой модели кодека. Она представляется в обобщенном виде с учетом всех его управляющих блоков, узлов и элементов канала, включая и систему передачи. Любые задержки, включая канальные, как более, так и менее одной миллисекунды игнорируются.

Аппроксимация при решении функциональных задач Haptic-кодека

При решении функциональных задач Haptic-кодека аппроксимационный механизм может быть использован в следующих случаях:

1. При формировании прямого канала цифровых систем дистанционного управления, когда известны входные и выходные параметры регулирования и диапазоны их изменения, но передаточная функция не задана или не определена для всех участков диапазона управления или регулирования.

2. В обратных каналах систем дистанционного управления при исследовании тактильных откликов в реальных системах по значениям параметров, снимаемых с объектов манипулирования, и входному диапазону используемых приемников и манипуляторов тактильных сигналов, а также для определения тактильных передаточных функций.

3. Для компенсации значимых задержек путем вычисления промежуточного значения управляющего сигнала по передаточной функции в прямых каналах систем ДУ в случае медленных каналов связи, каналов с замираниями и при потере части пакетов. Фактически в этом случае производится аппроксимация значений сигналов дистанционного управления при заданных предельных значениях параметров или задание шага управляющих воздействий чаще, чем позволяет передавать реальный канал.

4. Для компенсации значимых задержек путем вычисления промежуточного значения тактильного или следящего сигнала по передаточной функции в обратных каналах систем ДУ при ограничении и нехватке скорости передачи или полосы пропускания. Таким образом, предлагается реализовать плавную аппроксимацию выходных параметров, включая сигналы тактильности, позиционирования или параметрического слежения при ограничениях и нехватке скорости передачи или полосы пропускания.

Исходя из перечисленных пунктов, для Haptic-кодека формулируется задача аппроксимации передаточной функции цифровой управляющей системы по нескольким известным точкам – отдельным отсчетам δ -функций с известными абсолютными значениями входного и выходного параметра – с целью дальней-

шего вычисления выходного сигнала по известному или предполагаемому значению входного сигнала в прямом или обратном канале. При этом следует учитывать, что количество значений для расчета сигнала или параметра может быть минимальным, а требования к скорости расчета высоки, а следовательно, алгоритм не должен быть громоздким. Оптимальным при этом представляется алгоритм с использованием быстросходимых функций, полиномов или рядов. Следующим требованием для кодека является возможность аппроксимировать функции произвольной формы с учетом реализуемости физических систем.

Процедура аппроксимационной обработки сигналов для Haptic-кодека

С учетом поставленных задач сформулируем для Haptic-кодека общую идею процедуры аппроксимационной обработки сигналов для одного i -го параметра.

1. Исходными значениями для процедуры являются входные значения управляющих воздействий от оператора и выходные значения сигналов для манипулятора в виде отдельных отсчетов δ -функций цифровой системы.

2. Вычисляем значения коэффициентов аппроксимирующего полинома, рассмотрев задачу по предложенной модели.

3. Определяем передаточную функцию и вычисляем значения выходного сигнала (параметра), используя предложенную модель с занесением результатов в буферную память и использованием их по мере востребования для вышеперечисленных задач.

Запишем передаточную функцию (2) в области изображений для блока замещения для реализуемых физических систем, где $N \geq M$.

$$F_i(p) = \frac{Y_i(p)}{X_i(p)} = \frac{\sum_{m=0}^M a_m p^m}{\sum_{n=0}^N b_n p^n} = \frac{a_0 + a_1 p + \dots + a_{M-1} p^{M-1} + a_M p^M}{b_0 + b_1 p + \dots + b_{N-1} p^{N-1} + b_N p^N}. \quad (2)$$

В зависимости от длины и нагруженности каналов и от стадии работы системы возможны три случая:

1. $N > M$ – типичный случай для достаточно удаленных от оператора объектов, когда применение аппроксимации востребовано на обоих концах канала для всех четырех типов функциональных задач, перечисленных выше, в том числе для следующих задач: сопряжение оконечного оборудования, работающего с разной частотой дискретизации; считывание отсчетов управления через выходной буфер сопряжения.

2. $N = M$ – идеальный случай для работы на коротких расстояниях с мало нагруженными каналами достаточной ширины. При этом функционал работы кодека не ограничивает классы и типы задач, поэтому подстраховка данных с буферизацией не исключает применение аппроксимации, особенно при случайной потере

пакета со следующим переходом в режим работы первого случая.

3. Случай $b_1 = b_2 = \dots = b_{n-1} = 0; b_0 = 1$ – случай начала работы, определяющий получение первого отсчета, включая различные варианты необходимости аппроксимации сигналов и параметров для работы на разных каналах и дистанциях.

Для рассмотренных случаев предполагается использовать быстросходящиеся степенные разложения на базе полиномов Эрмита, Лагерра, Лежандра и, возможно, других типов ортогональных полиномов, которые в сравнении между собой или в комбинациях дадут необходимую точность аппроксимации при использовании классического подхода ее оценки [8, 10, 11].

Заключение

Представление обобщенной модели Nartic-кодека в виде параметрической системы регулирования позволило определить следующее:

1. Полная система элементов управления Nartic-кодека представляется в виде трех сигнальных подсистем, каждая из которых характеризуется соответствующей передаточной функцией.

2. В зависимости от состояния системы и особенностей каналов передачи работа Nartic-кодека рассматривается как три различных случая, в каждом из которых требуемый механизм аппроксимации реализуется при помощи быстросходимых полиномиальных функций.

Литература

1. Кучерявый, А. Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016. – № 1. – С. 44–46.
2. The Tactile Internet. Technology Watch report. Geneva: ITU-T, 2014. – 24 p.
3. Владимиров, С. С. Механизм компенсации задержек для приложений Тактильного Интернета / С.С. Владимиров, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2018. – № 3. – С. 62–67.
4. Владимиров, С. С. Передача данных в тактильном интернете / С.С. Владимиров // Электросвязь. – 2018. – № 5. – С. 44–48.
5. Владимиров, С. С. Nartic-кодек в структуре тактильного интернета / С.С. Владимиров, С.А. Владимиров // Информация и Космос. – 2018. – № 2. – С. 30–36.
6. The Tactile Internet: Vision, Recent Progress, and Open Challenges / M. Maier [et al.] // IEEE Communications Magazine. – May 2016. – Vol. 54, Iss. 5. – P. 138–145.
7. Маколкина, М. А. Развитие услуг дополненной реальности в рамках концепции тактильного интернета / М.А. Маколкина // Электросвязь. – 2017. – № 2. – С. 36–40.
8. Смирнов, В. И. Курс высшей математики, Том 3. Часть 2 / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1974. – 817 с.
9. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

10. Ланцош, К. Практические методы прикладного анализа. Справочное руководство / К. Ланцош. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 524 с.

11. Свешников, А. Г. Лекции по математической физике: Учебное пособие / А.Г. Свешников, А.Н. Боголюбов, В.В. Кравцов. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 352 с.

Оценка пространственных характеристик антенной системы мобильного узла интеллектуальной транспортной системы при его работе в одном частотном диапазоне с первичной сетью радиосвязи

Radiation pattern spatial characteristics evaluation of the ITS mobile node while operating at the same frequency with primary network

Щесняк / Shchesniak A.

Анна Сергеевна

(anna.schesnyak@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система – intelligent transportation system; имитационное моделирование – modeling; управляемые антенные системы – smart antennas; отношение сигнал/шум+помеха – Signal-to-interference-plus-noise ratio.

В статье рассмотрена совмещенная однородная вторичная сеть радиосвязи (ВСР), функционирующая в интересах интеллектуальной транспортной системы (ИТС) в одном частотном диапазоне с первичной сетью оператора фиксированной радиосвязи (ПСР). Представлены результаты моделирования управляемых антенных систем, исходя из ширины диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности в двух главных плоскостях, с целью определения значения отношения сигнал к смеси шума и помехи (ОСШП) на входе приёмопередающего оборудования ПСР.

This paper provides an example of the combined secondary network, utilized for Intelligent Transportation System (ITS) operation, and primary static network operation within the same spectrum frequency. We show the effects of the radiation pattern characteristics on the primary network receiver SINR and the main goal of this study is its minimization. The results show that the ITS antenna radiation pattern in azimuth plane should not exceed 15° while for the elevation angle it is not critical but must be kept preferably as narrow as possible for the desired scenario.

Введение

Эволюция систем беспроводной радиосвязи привела к появлению новых технологий для поддержки новых сервисов, приложений и соблюдения требуемых критериев качества. Значительное развитие претерпевают и системы связи, функционирующие в интересах ИТС [1]. В системах радиосвязи немаловажную роль в дости-

жении высокой производительности играют антенные системы [2]. Для реализации приложений, используемых в радиосетях для ИТС, все большее внимание приобретают многоантенные технологии, дающие возможность пространственного разнесения за счет формирования узкого главного лепестка ДН и нулей в направлении прихода помех, а также разнесения на приемной и передающей стороне [3].

Данная работа посвящена изучению вопросов совместного функционирования в одном частотном диапазоне ПСР фиксированного радиодоступа и ВСР для ИТС. Основное внимание посвящено технологии управляемых антенных систем, так как она позволяет осуществлять совместную работу за счет управления ДН антенной решетки (АР). Антенные решетки позволяют управлять их ДН и задавать требуемые при проектировании характеристики путем подбора фазового и амплитудного распределения токов в излучающих элементах АР. Сканирующие АР, в которых максимум ДН может быть ориентирован в направлении различных точек пространства, основаны на контроле фазового распределения между антенными элементами. Надлежащее амплитудно-фазовое распределение (АФР) отдельных антенных элементов позволяет формировать требуемую ДН, управляя основными характеристиками АР, такими как ширина и направление главного максимума ДН, уровень боковых лепестков и др.

Модель и сценарии функционирования ВСР для ИТС

Данная работа основывается на аналитической модели, приведенной в статье автора [4]. Для выбора антенного решения, подходящего под сценарии совместной работы ВСР для нужд ИТС и ПСР, было проведено имитационное моделирование в программном пакете MatLab. На представленном ниже рис. 1 изображен

сценарий движения транспортного средства (ТС) и расположение приемопередающего оборудования, установленного на ТС и статичных инфраструктурных объектах обеих сетей. В рассматриваемом сценарии транспортное средство движется в полосе по направлению к объекту придорожной инфраструктуры (приемопередатчик ВСП – Rx_0) и базовой станции ПСР Rx_1 . Приемопередатчик на транспортном средстве обозначен Tx_0 . Антенная система расположена на крыше транспортного средства на высоте h_1 метров. Приемопередатчик БС ВСП подвешивается к объекту придорожной инфраструктуры: фонарным и светофорным столбам, крышам остановок общественного транспорта и т.п. В условиях городской застройки такие объекты встречаются каждые 30–60 метров. Высота подвеса антенной системы в данном случае обозначена h_2 метров. Антенная системы БС ПСР расположена на высоте h_3 метров.

В данном примере принято, что расстояние d_1 между Tx_0 и Rx_0 изменяется при приближении ТС к придорожному объекту от 100 метров до 0 метров, когда они оказываются на одной x -координате. Местоположение ТС в полосе отражено расстоянием от дальнего края дороги (оси y) d_3 , которое принято равным 3 метрам. Высоты расположения антенной системы на ТС (высота ТС), на придорожном объекте ВСП и на объекте ПСР приняты равными $h_1 = 1,5$ метра, $h_2 = 3$ метра и $h_3 = 4$ метра соответственно. Далее рассматриваются три сценария размещения оборудования ПСР.

1. В первом сценарии Rx_0 и Rx_1 равноудалены от края дороги и отстают от него на $d_4 = d_5 = 7$ метров. Данное предположение подразумевает, что они расположены на одном объекте придорожной городской инфраструктуры (осветительном столбе, светофорном столбе, остановке общественного транспорта и т.п.). Модель потерь при распространении взята согласно 3GPP 38.901 для сценария UMi, а при расположении передатчика и приемника на расстоянии менее 10 метров для сценария InH [5]. Выбор данной модели обусловлен широким охватом и применимостью к сценарию ИТС [6].

2. Во втором сценарии Rx_0 располагается ближе к краю дороги, чем Rx_1 ($d_4 < d_5$). Данное предположение подразумевает, что они расположены на разных

объектах придорожной городской инфраструктуры, т.е., например, Rx_0 располагается на столбе, в то время, как Rx_1 на крыше остановки общественного транспорта.

3. В третьем сценарии оборудование ПСР располагается на более значительной высоте, т.е. рассматривается сценарий установки его на здания. В качестве ПСР взята система беспроводного моста конфигурации точка-точка фирмы Tsunami Quick Bridge 8200 с характеристиками, приведенными в [7]. Данное оборудование является Ethernet-мостом, предоставляющим возможность провайдерам, коммерческим организациям и государственным учреждениям организовать надежное, безопасное и экономически оправданное беспроводное соединение.

Метод определения нарушений ЭМС и результаты имитационного моделирования

При моделировании данные о ширине полосы проезжей части принимаются в соответствии с ГОСТ Р 52398-2005 «Классификация автомобильных дорог» [8]. Выбран класс «дороги обычного типа», категории III и IV. Ниже представлены результаты моделирования возможного нарушения ЭМС при работе ВСП для нужд ИТС в одном частотном диапазоне с ПСР. Оцениваемым критерием выступило отношение сигнала к смеси шума и помехи (ОСПП) на входе приемника ПСР и сравнение этого значения со значением недопустимого уровня наводимых помех, рассчитанного исходя из данных, указанных в спецификации оборудования, рассматриваемого в качестве оборудования ПСР. Будем считать, что в ПСР используется модуляция QAM-64. Для данной системы можно однозначно рассчитать максимальное значение ОСПП в соответствии с частотой ошибки передачи пакета, равной 10%. Исходя из значения чувствительности оборудования, было получено ОСПП для соответствующего значения надежности работы ПСР, равное 27 дБ. Моделирование производилось при предположении варьирования ширины ДН АР по уровню половинной мощности подвижного передатчика ВСП от 10 до 40 градусов в азимутальной и угломестной плоскостях. Антенная система на Rx_0 предполагается секторной с

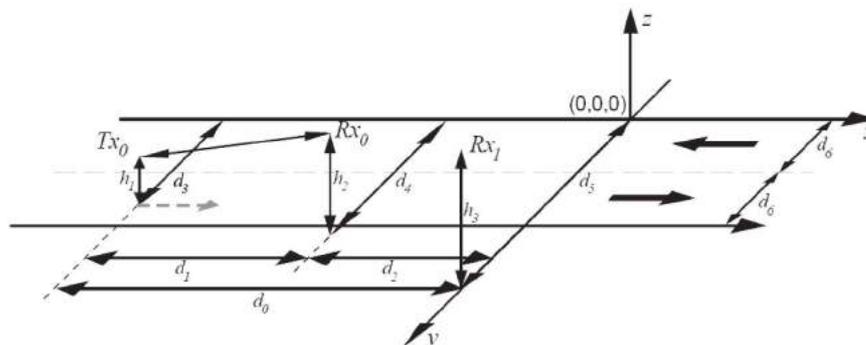


Рис. 1. Сценарий подвижной радиосвязи для ИТС

покрытием в 180° . Таким образом, покрытием обеспечена вся обращенная к дороге сторона.

Результаты моделирования первого сценария приведены на рис. 2. Обратимся к методам управления ДН антенной системы. При предположении механического управления лучом ширина ДН в обеих плоскостях не претерпевает изменений. Предположение же электронного сканирования за счет изменения фазового распределения токов в отдельных элементах АР вносит правки во входные данные, используемые при моделировании, так как ширина ДН по уровню половинной мощности и уровень боковых лепестков меняются в зависимости от углов сканирования.

В левой части рис. 2 представлены результаты, основанные на предположении механического управления лучом, т.е. при использовании, например, механических приводов для вращения всей антенной системы. Прямой линией на графиках отображается критерий нарушения ЭМС, т.е. значение в 27 дБ. Из представленных рисунков можно сделать вывод, что ширина ДН по уровню половинной мощности в угломестной плоскости практически не имеет влияния на значения ОСШП. Однако выбор ширины ДН в азимутальной плоскости может иметь весомое влияние на нарушение ЭМС. Это обусловлено небольшой разницей в высоте

подвеса оборудования ВСП и ПСП на объекте придорожной инфраструктуры. Также можно видеть, что во всех рассматриваемых случаях на расстоянии от 100 до 45 метров нарушения ЭМС не наблюдается. При дальнейшем приближении к БС ВСП характер графика претерпевает изменения, и можно сделать вывод, что оптимальной шириной ДН АР будет являться ширина 15° в азимутальной плоскости. Гораздо лучшие показатели у антенной решетки с шириной ДН 10° в той же плоскости, но такое сужение ширины потребует использования большего числа антенных элементов, следовательно, увеличит габаритные размеры системы, а также усложнит реализацию диаграммообразующей схемы и повысит ее стоимость (наличие дополнительных фазовращателей, делителей, управление ими).

Другим рассматриваемым случаем, является сценарий расположения оборудования ПСП на многоэтажных строениях, что должно повысить степень пространственного разнесения приемопередающего оборудования ПСП и ВСП. Результаты моделирования сценария приведены на рис. 3.

Аналогично первому сценарию, в некоторых местах наблюдается нарушение ЭМС. Но большее разнесение по высоте подвеса антенных систем мобильного узла и приемопередатчика ПСП вносит свой

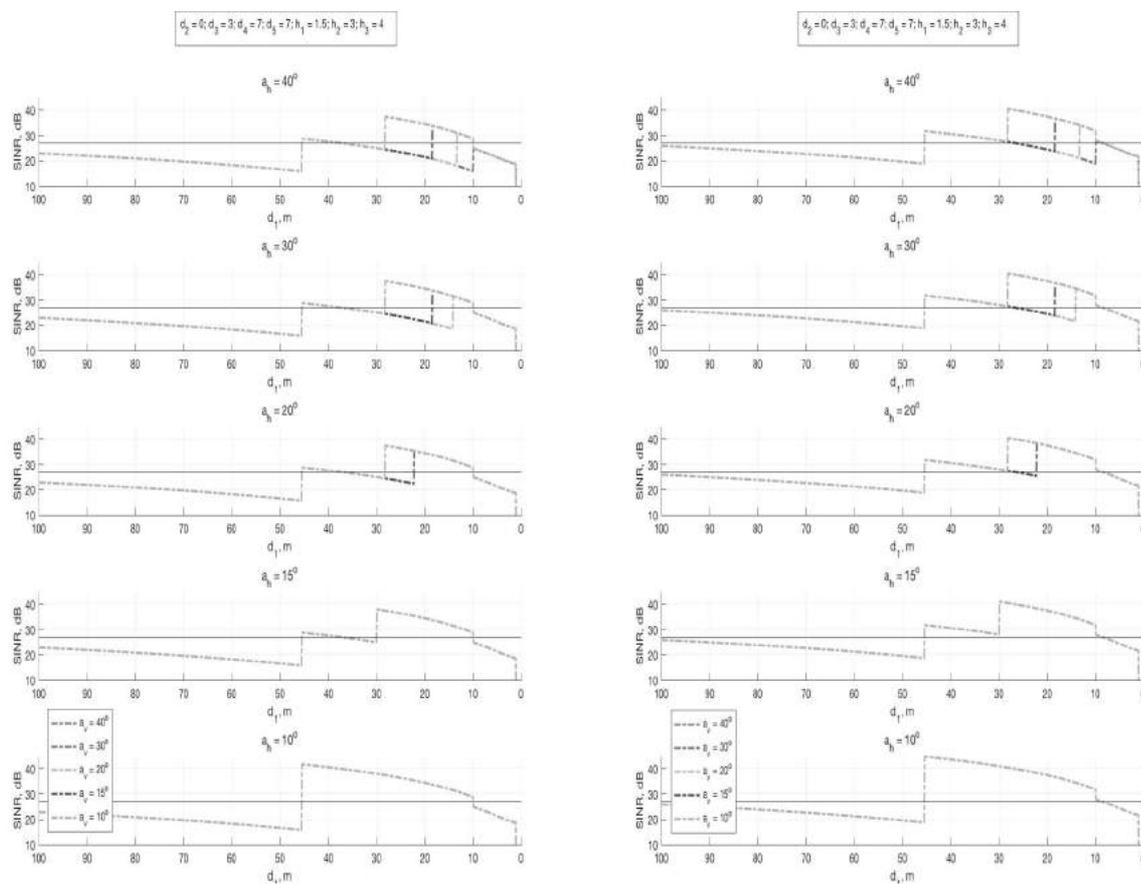


Рис. 2. Сценарий 1: механическое (слева) и электронное (справа) управление лучом

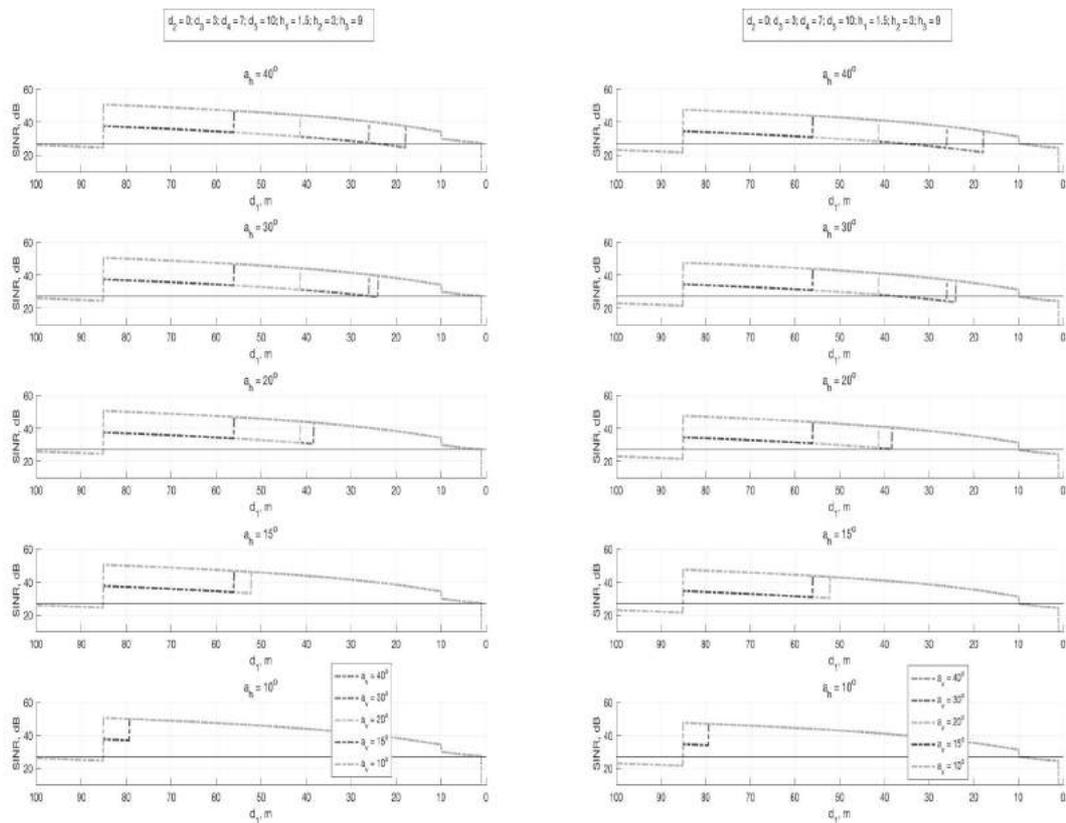


Рис. 3. Сценарий 2: механическое (слева) и электронное (справа) управление лучом

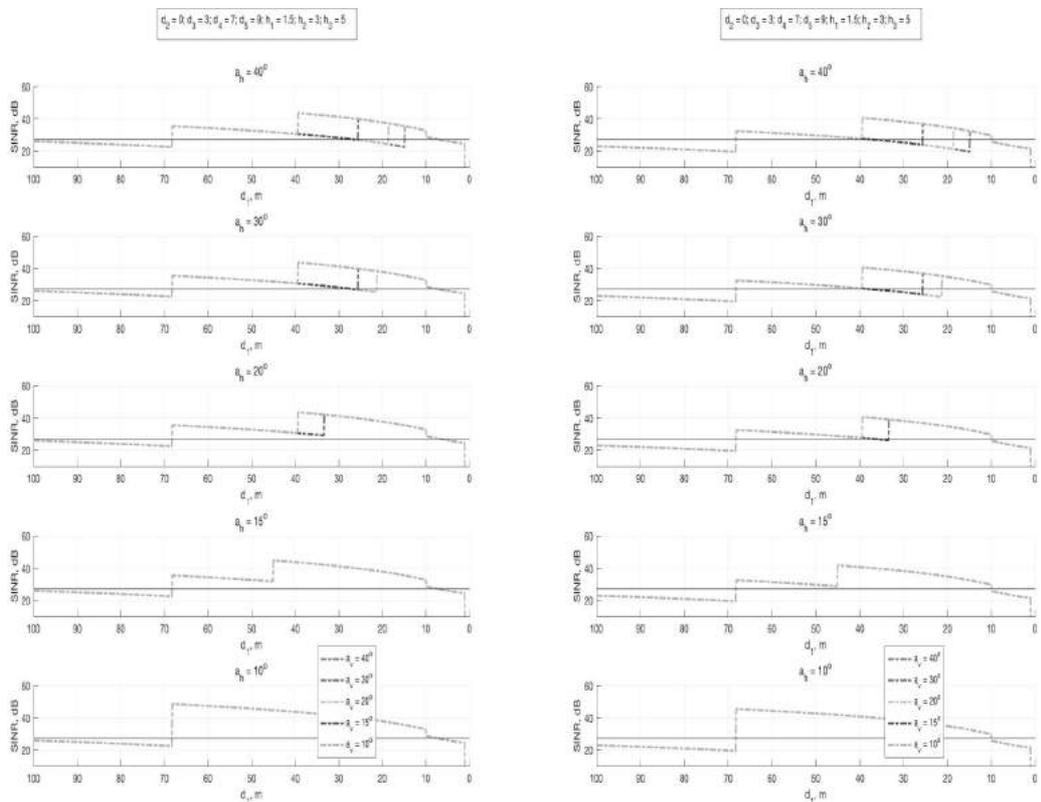


Рис. 4. Сценарий 3: механическое (слева) и электронное (справа) управление лучом

вклад, а именно, области, в которых нарушений ЭМС не происходит, значительно расширились. Нарушение ЭМС вблизи нулевого значения расстояния может быть объяснено влиянием бокового излучения антенной системы.

Последний сценарий расположения оборудования ПСР заключается в использовании придорожных объектов, при этом возможные высоты подвеса антенных систем обладают незначительным отличием (различие принято равным 1 метру). Это могут быть остановки общественного транспорта, более высокие столбы освещения, и т.п. Результаты моделирования приводятся на рис. 4.

По сравнению со сценарием расположения оборудования на одном инфраструктурном объекте, можно наблюдать незначительное улучшение показателя ОСШП из-за дополнительного пространственного разнесения. В остальном общий характер графиков совпадает с характеристиками графиков первых двух сценариев.

Заключение

Исследование беспроводных сетей для ИТС, работающих в одном частотном диапазоне с прочими приоритетными сетями связи, является перспективным направлением в силу ограниченности спектрального ресурса, а также выделения частотного спектра таким сетям в областях, пересекающихся с диапазонами иных первичных сетей. Функционирование приёмопередающего оборудования высокоподвижных мобильных узлов ИТС безусловно имеет негативное влияние на ОСШП первичной сети. Данная работа ставит своей целью исследование и оценку данного влияния, а также определение пространственных характеристик антенных систем приёмопередающего оборудования мобильных узлов сети для ИТС, удовлетворяющих критерию минимизации такого влияния.

Исходя из результатов имитационного моделирования, заключается, что разрабатываемая антенная система должна иметь ширину главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в азимутальной плоскости не более 15 градусов с целью минимизации влияния на ПСР. Ширина главного лепестка ДН в угломестной плоскости имеет меньшее значение, однако чем уже луч, тем лучше значение ОСШП.

Литература

1. Урлич, Ю. М. Актуальные вопросы развития интеллектуальных транспортных систем / Ю.М. Урлич // Интеграл. – 2010. – № 3. – С. 7–9.
2. Grigoryev, V. Combined Adaptive Spatial-Temporal Signal Processing System Based on Sequential Circuit with Dependent Component Adaptation / V. Grigoryev, I. Khvorov // Proc. of Conference on Smart Spaces. – 2015. – P. 621–635.
3. Анализ элементов ИТС: терминология, классификация, модели взаимодействия / В.О. Аксенов [и др.] // Электросвязь. – 2014. – № 1. – С. 10–13.

4. Щесняк, А. С. Математическая модель планирования вторичной сети радиосвязи интеллектуальных транспортных систем, функционирующей на фоне первичной сети фиксированной радиосвязи / А.С. Щесняк // Электросвязь. – 2018. – № 6. – С. 49–55.

5. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz [Электронный ресурс]. – 3GPP Technical Report TR 38.901 v14.1.1, Jul. 2017. – Режим доступа: http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/38_series/38.901/38901-e11.zip, свободный. – Загл. с экрана

6. 3D channel model in 3GPP / M. Bishwatup [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53, No. 3. – P. 16–23.

7. Proxim Wireless. Спецификация Tsunami Quick Bridge 8200 Series. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://objects.eanixter.com/PD388227.PDF>, свободный. – Загл. с экрана.

8. ГОСТ Р 52398–2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. – Введ. 2006–05–01. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 4 с.

Что есть так называемые «Когерентные системы передачи»?

What are the so-called "Coherent transmission systems"?

Власов / Vlasov I.

Игорь Иоильевич

(i.vlasov@loniis.ru)

Филиал ФГУП «Ленинградское

отделение центрального научно-исследовательского института связи»,

заместитель начальника НТЦ-288.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: оптическая система передачи – optical transmission system; когерентный гетеродиновый приемник сигнала – coherent heterodyne signal receiver; квадратурно-фазовая модуляция с двойной поляризацией сигнала – quadrature and phase modulation with dual polarization of a signal; метод прямого фотодетектирования – direct photodetection method; метод фотосмешения – photomixing method; отношение оптический сигнал/шум – optical signal/noise ratio; оптическое усиление сигнала – optical amplification of a signal.

Представленная статья рассказывает о том, что такое оптические системы с когерентным гетеродиновым приемом, называемые на профессиональном сленге связистов «когерентными системами». Автор описывает принципы построения таких систем, ссылается на используемые в них патенты и стандарты, дает определения и сравнения разных оптических компонентов систем передачи с когерентным оптическим приемом, упоминает о применяемых в них методах кодирования линейного сигнала.

This article discovers the definition of optical systems with coherent heterodyne reception, called "coherent systems" by communications operators in their industry buzzword. The author describes the principles of these systems arrangement, makes reference to patents and standards used in them, defines and compares various optical components of transmission systems with coherent optical reception, specifies methods of linear signal coding used in them.

Относительно недавно появились системы ВОСП, работающие на линейных скоростях 100G, периодически называемые когерентными системами передачи. Принципы построения таких систем начали разрабатываться достаточно давно, практически сразу после появления когерентных источников излучения – лазеров, в начале 60-х годов двадцатого века. Однако практическая реализация когерентных систем на коммерче-

ских сетях связи началась только во втором десятилетии XXI в., что обусловлено рядом факторов: сложность схем передатчиков и приемников потребовали создания специальных технологий планарной оптики PLC (Planar Lightwave Circuit) для оптических фильтров, компенсаторов дисперсии, модуляторов, смесителей, циркуляторов, коммутаторов и т. д. Кроме того, при реализации технологии необходимо применение быстродействующих электронных процессоров для осуществления линейного кодирования, узкополосных перестраиваемых высокостабильных лазеров с внешними модуляторами и устройствами управляемой поляризации сигнала для организации линейного тракта, высокочувствительных малошумных и широкополосных фотодетекторов для надежного приема оптического сигнала. Сейчас найти описание принципов работы подобных систем достаточно сложно – компании-производители тщательно скрывают такую информацию. Конечно, существует стандарт на 100G интерфейсы – IEEE 802.3, однако он описывает только клиентскую часть подобной системы и предназначен для организации стыковки подобных систем со сторонним оборудованием, а вот реализация именно линейного тракта покрыта густой «фирменной» тайной. Немного приоткрыть ее можно, если внимательно почитать один из документов, который можно найти в открытом доступе – патент 2008140162/09 «КОГЕРЕНТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК С УПРАВЛЕНИЕМ ПОСРЕДСТВОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И С ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ/КОРРЕКЦИЕЙ» от 01.03.2007, принадлежащий компании ДИСКАВЕРИ СЕМИКОНДАКТОР ИНК. Этот документ описывает специфический оптический приемник с гетеродином и обратной связью для увеличения чувствительности и избирательности. В качестве гетеродина такого приемника выступает оптический когерентный лазер. Привожу выдержки из этого документа.

«Когерентное оптическое детектирование интенсивно исследовалось применительно к волоконной

оптике в 80-е и 90-е годы. Однако с появлением оптических усилителей работы по этим универсальным и высокочувствительным приемникам были свернуты. Надо заметить, что были достигнуты значительные усовершенствования в отношении оптических компонентов. Они включают в себя выходную мощность лазерного сигнала, стабильность ширины линии и шум, а также полосу, возможности передачи энергии и ослабление синфазного сигнала (сбалансированных) фотодетекторов. Достижения в электронных микроволновых компонентах позволяют использовать преимущества оптического когерентного детектирования над прямым детектированием. Авторы настоящего изобретения понимают, что это делает когерентное оптическое детектирование весьма привлекательным для линий связи будущего.

Например, использование оптического когерентного приемника позволяет детектировать сигналы очень низкой интенсивности, более низкой, чем могут воспринимать традиционные оптические приемники. Это особенно важно для детектирования сигналов на оптических длинах волны, где оптическое усиление с низким уровнем шума невозможно. Кроме того, когерентное детектирование позволяет сохранять информацию фазы оптического сигнала. Это полезно для детектирования оптических сигналов, где информация содержится в фазе электромагнитной волны. Для этого требуется стабильная синхронизация по фазе и/или частоте между принятым оптическим сигналом и оптическим гетеродином, используемым в когерентном приемнике.

Основные составные части когерентного приемника включают в себя оптический гетеродин, оптический ответвитель, сбалансированный фотодетектор, блок синхронизации по фазе/частоте, блок управления поляризацией и блок обработки электрического сигнала.

В структуре когерентного приемника принятый оптический сигнал смешивается со светом оптического гетеродина (LO). Таким образом, сигнал преобразуется с понижением частоты от частоты оптической несущей (~200 ТГц на 1,55 мкм) до частоты микроволновой несущей (обычно

несколько гигагерц). Результирующий сигнал биений после фотодетектирования демонстрирует центральную частоту, которая соответствует промежуточной частоте (ПЧ), которая равна разности между частотой сигнала и частотой LO.» [1].

Таким образом, можно сказать, что правильное название подобных систем – это «Системы передачи с когерентным гетеродиновым приемником сигнала», где в качестве гетеродина используется высокостабильный узкополосный когерентный источник излучения – высококачественный лазерный излучатель. Именно такой приемник сигнала позволяет детектировать высокоскоростные оптические сигналы, имеющие очень низкий уровень, почти не отличимый от уровня шума.

Как показано на рис. 1, система 100G имеет два интерфейса – клиентская сторона и линейная сторона. Клиентские интерфейсы предназначены для подключения к ВОСП оборудования заказчика и используют стандартные интерфейсы подключения, перечисленные в таблице 1. Поток 100G разбивается здесь на 4 или 10 λ, которые передаются по одному или нескольким волокнам, а также с использованием Ribbon-волокон, имеющих несколько сердцевин. Интерфейсы клиентской стороны используют простую амплитудную манипуляцию ООК (on-off keying), чем достигается высокая совместимость оборудования различных производителей. Дальность передачи зависит от типа интерфейса, но в любом случае не превышает 40 км.

Линейные интерфейсы предназначены для передачи сигналов по оптическому волокну на большие расстояния, исчисляемыми сотнями и даже тысячами километров. Именно здесь и используются когерентные оптические приемники. Конкретная техническая спецификация этого интерфейса не сертифицирована и зависит от фирменной реализации системы. Однако можно сказать, что основной способ кодирования сигнала, применяемый всеми основными производителями, – это квадратурно-фазовая модуляция с двойной поляризацией сигнала – DP QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying). По сути, в линию транслируются два



Рис. 1 Обобщенная структура ВОСП 100G

Таблица 1

Интерфейс	Расстояние	Среда передачи	Условия передачи	Стандарт
100GBase-LR4	10 км	SMF	4 λ	IEEE 802.3ba
100GBase-ER4	40 км	SMF	4 λ	IEEE 802.3ba
100GBase-SR10	100–125 м	MMF	10 волокон	IEEE 802.3ba
100GBase-CR10	7 м	Медный кабель	10 кабелей	IEEE 802.3ba
10x10 MSA	10–40 км	SMF	10 λ	10x10 MSA Tech. Spec.

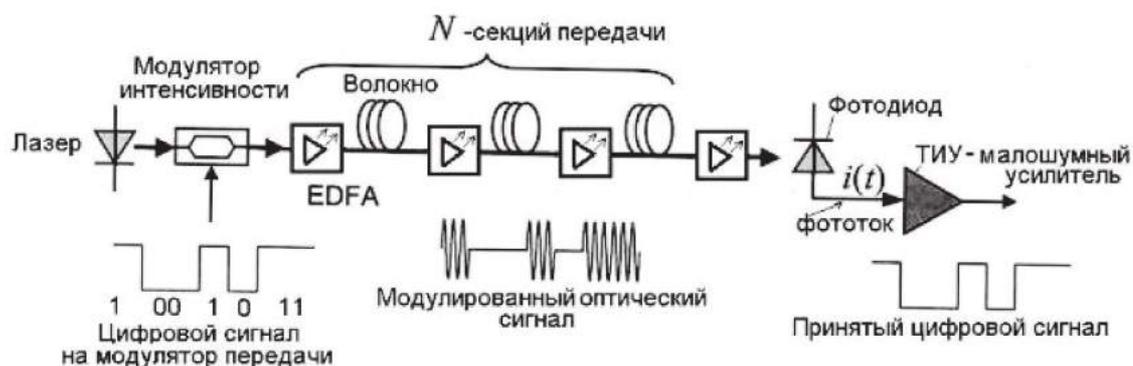


Рис. 2. Структурная схема ВОСП некогерентного типа

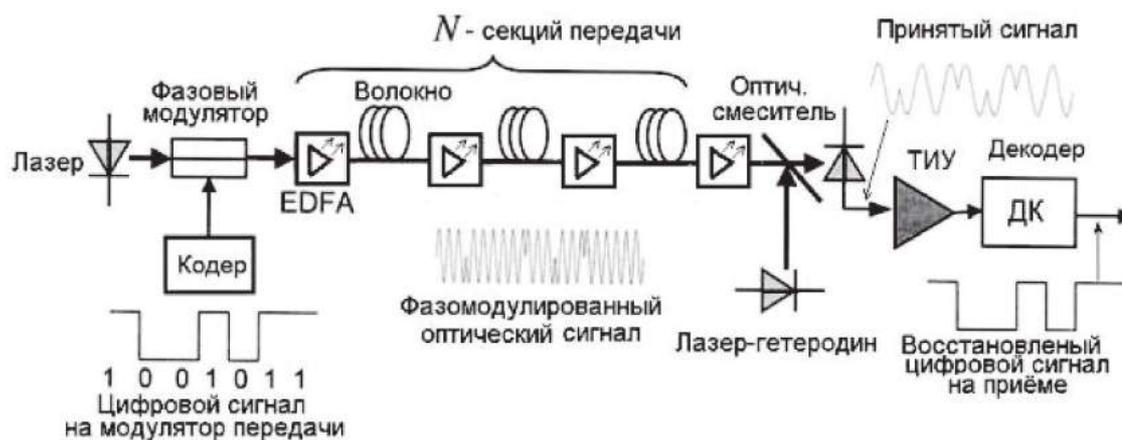


Рис. 3. Структурная схема ВОСП когерентного типа

ортогонально поляризованных оптических сигнала с квадратурно-фазовой модуляцией каждый, что позволяет снизить скорость передачи линейного сигнала в восемь раз, значительно уменьшая негативное влияние дисперсии оптического сигнала и уменьшая требуемую для передачи полосу.

В высокоскоростных ВОСП теоретически возможно использование как некогерентного, так и когерентного принципов передачи. Как правило, некогерентная передача сигналов используется в оптических каналах на скорости до 10 Гбит/с. При этом в излучателе применяется либо прямая, либо внешняя модуляция одномодового лазера и прямое детектирование линейного оптического сигнала на приеме относительно простым фотоприемным устройством (рис. 2). При этом для увеличения дальности передачи оптических сигналов в волоконной линии используются оптические усилители, например эрбиевые (EDFA).

В структуре ВОСП когерентного типа при сохранении аналогичных функций линейного тракта с оптическим усилением принципиальные отличия заключены в структурах передатчика и приемника (рис. 3).

Оптические передатчики когерентных систем обобщенно подразделяются на три вида:

– передатчики с прямой модуляцией оптического излучения (рис. 4а);

– передатчики с простой внешней модуляцией оптического излучения (рис. 4б);

– передатчики с генераторами оптических импульсов (на одной, двух и более модах) и модуляторами этих импульсов отдельно по интенсивности или фазе, комплексной модуляции (рис. 4в).

Схемы передатчиков с прямой модуляцией интенсивности оптического излучения отличаются низким качеством модулированного сигнала, в котором присутствуют искажения формы импульсных оптических посылок – так называемый чирпинг-эффект, т. е. паразитная частотная модуляция излучаемого оптического спектра. Кроме того, таким передатчикам характерны повышенные шумы модулятора и расширенный спектр, приводящий к дисперсионным искажениям при распространении сигнала в волокне. Такая схема чувствительна к температурным отклонениям и нуждается в термостабилизации, например встроенными микрохолодильниками на основе эффекта Пельтье или применения электронной цепи регулировки тока смещения через фильтр нижних частот (ФНЧ). Такие передатчики используются для организации связи на огра-

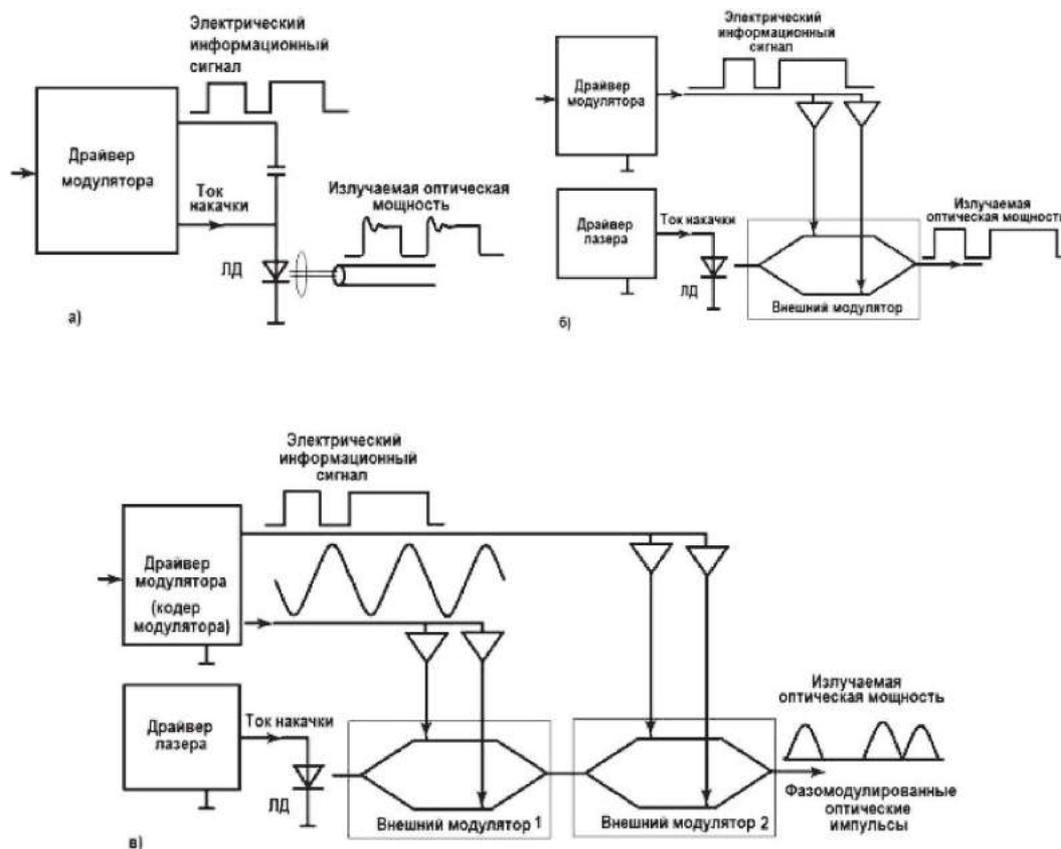


Рис. 4. Обобщенные структуры передатчиков когерентных систем

ниченные расстояния (от нескольких метров до 2 км по международной стандартизации ITU-TG.693) на скоростях до 10–40 Гбит/с и представлены в стандартных модулях SFP, SFP+, XFP, CFP.

Передачики с внешним по отношению к лазеру модулятором (рис. 4б и 4в) не подвержены чирпинг-эффекту. Они имеют в несколько раз большую полосу частот модуляции и, соответственно, увеличенную (до 100 Гбит/с и более) скорость передачи. При использовании же двойной схемы внешней модуляции (рис. 4в) требуемая полоса частот модулированного сигнала (например, 50 ГГц) не будет изменяться с увеличением скорости передачи информационных данных (например, при переходе от 10 Гбит/с к 100 Гбит/с). Это позволит сохранять сетку частот DWDM, т. е. число организуемых в линейном тракте оптических каналов, общий уровень мощности всех каналов до нелинейного ограничения при увеличении скорости передачи в каждом канале (до 100/400 Гбит/с) почти независимо от длины секции передачи или мультиплексирования (до 10 Тбит/с). Такая структура оптического передатчика дает теоретическую возможность наращивать скорости в канале до 1 Тбит/с, а в пределах полос волокон C, L до 30 Тбит/с, что близко к предельному значению частотного ресурса волокон.

Одним из первых эффективных и широко применяемых решений по построению схем модуляторов для когерентной передачи стал модулятор с четырьмя параллельными оптическими каналами, построенным с двойным разветвлением (рис. 5). Такая схема позволила реализовать квадратурную фазовую модуляцию QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

Для реализации возрастающих по сложности схем модуляторов для когерентных систем используется технология планарных (плоских) оптических каналов, создаваемых на различных подложках PLC (Planar Lightwave Circuits): Silica-on-Silicon PLCs с применением металлов Au, Au/Sn, Cr, NiCr, TiW, Al и Ti/Pt; полимеров Polymer PLCs. В состав схем на

PLC могут входить не только разветвители, параллельные каналы, электроды управления, но и поляризаторы оптического излучения, которые преобразуют пучок света в две ортогональные волны, направляемые в параллельные структуры модулятора PDM QPSK (Polarization-Division Multiplexing Quadrature Phase Shift Keying) или DP QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying), где каждая волна модулируется по фазе своим закодированным сигналом QPSK1 и QPSK2.

Такие способы модуляции позволяют сильно ограничить полосу частот оптического сигнала и дают возможность наращивать скорость передачи информационных сигналов на оптической волне λ , не заботясь об изменении интервала между соседними λ или компенсации дисперсионных искажений. Кроме того, выбор кодирования может понизить или вообще исключить из спектра модулированного сигнала оптическую несущую, что значительно уменьшит общую интенсивность всех λ при многоканальной передаче, исключая нелинейные эффекты оптического тракта, поможет улучшить параметры OSNR, увеличивая дальность передачи.

Однако наибольший эффект для увеличения протяженности оптической линии дает именно когерентный прием. Для этого в состав фотоприемника системы передачи вводится дополнительный оптический генератор – гетеродин, что позволяет существенно повысить его чувствительность и тем самым увеличить динамический диапазон линейного тракта.

По принципу регистрации и первичной обработки информации, содержащейся в оптическом сигнале, различают два метода приема оптического излучения: метод прямого фотодетектирования и метод фотосмешения (когерентный прием излучения). Первый метод состоит в измерении фототока или в подсчете числа импульсов на выходе фотодетектора, вызываемых попаданием на него регистрируемого потока фотонов.

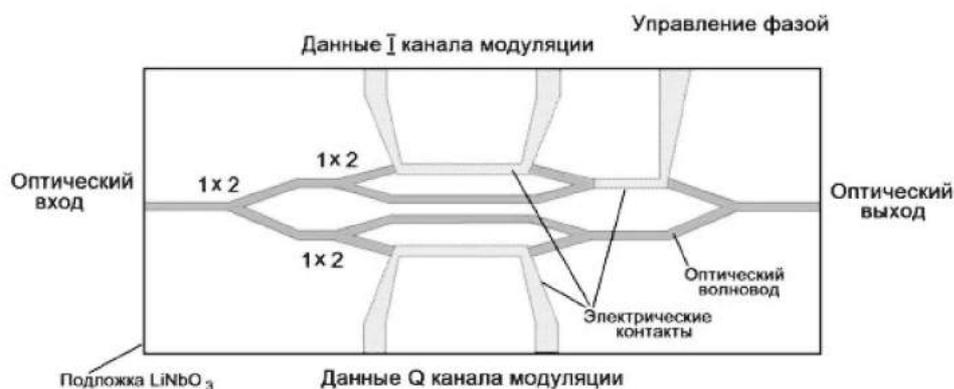


Рис. 5. Логическая структура внешнего модулятора передатчика когерентных систем

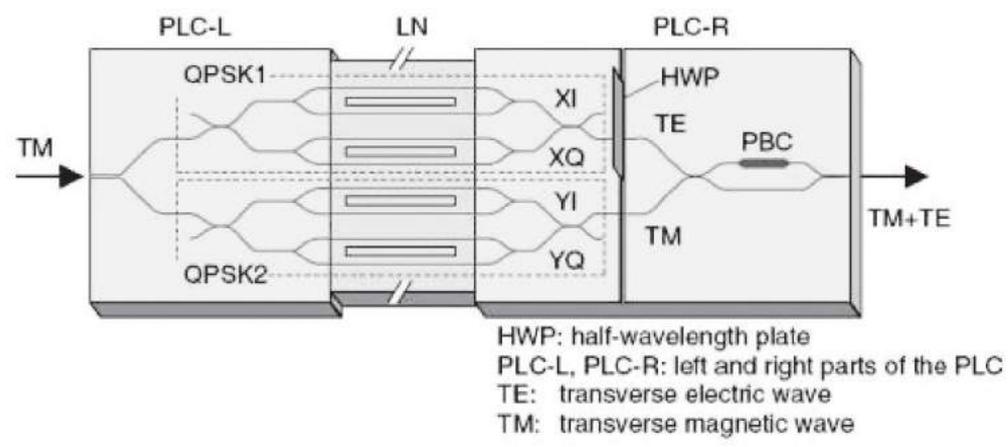


Рис. 6. Модулятор QPSK

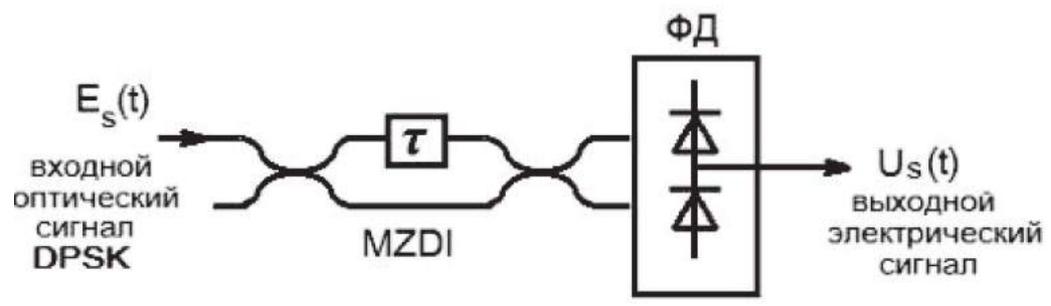


Рис. 7. Приемник оптического сигнала, основанный на методе прямого фотодетектирования

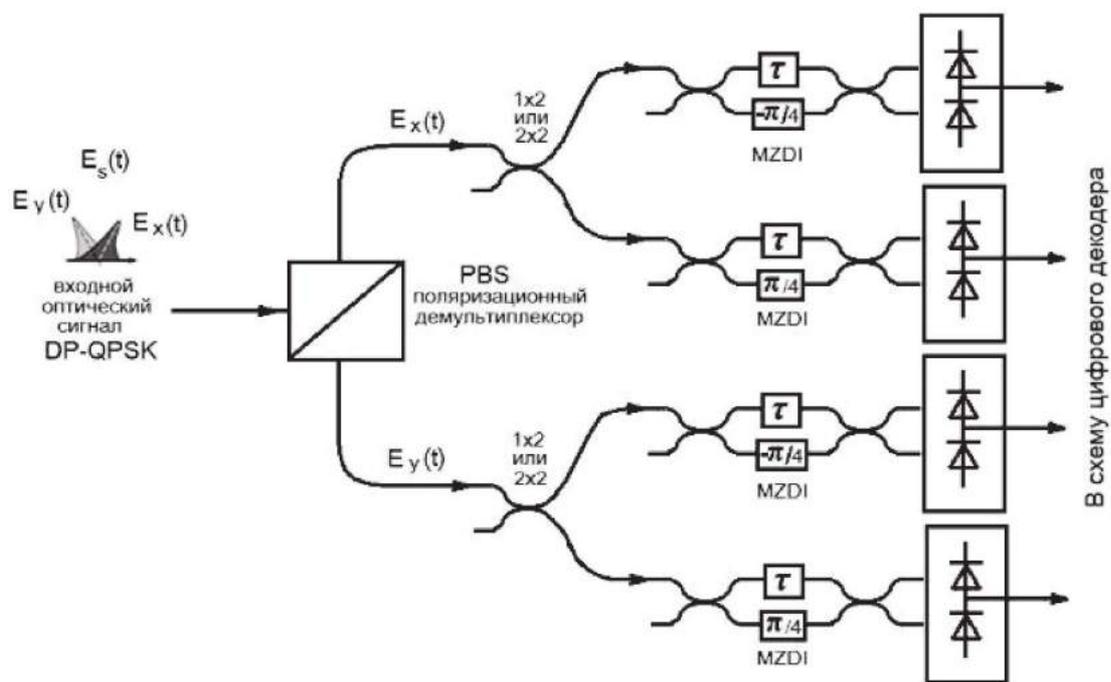


Рис. 8. Структура входной цепи некогерентного приемника оптического сигнала с двойной поляризацией DP(Dual-Polarization)

На рис. 8 представлены структуры входных цепей некогерентных оптических цифровых приемников, поддерживающих прием одной или двух ортогональных по поляризации волн. Во втором случае разделение волн происходит с помощью поляризационных разветвителей (демультиплексоров) PBS (Polarization Beam Splitters). Особенностью всех схем приемников является использование разветвителей 2×2 и интерферометров Маха–Зендера (MZDI) с включением в их параллельных каналах линий оптической задержки импульсов на тактовый интервал, обозначаемый τ , и фазовых задержек с различной кратностью π ($\pi/2$; $\pi/4$; $\pi/8$ и т. д.).

Главная особенность схем когерентных оптических приемников, как уже упоминалось ранее – наличие дополнительного источника оптического излучения (гетеродина) и цепи управления им. Такие приемники могут быть выполнены для различных условий оптического когерентного приема: гетеродинный несинхронный прием, гетеродинный синхронный прием, гомодинный синхронный прием (рис. 9).

Так в чем же смысл использования подобных схем оптических приемников? Понять это помогут следующие выкладки.

Комбинированное (суммарное) оптическое поле сигнала и оптического гетеродина $F(t)$ на единицу поверхности фотодетектора, называемое интенсивностью $I(t)$, имеет вид

$$I(t) = |F(t)|^2 = |a_c(t)|^2 + |a_0|^2 + 2|a_c(t)||a_0|\cos[(\omega_0 - \omega_c)t + \varphi_0 - \varphi_c(t)], \quad (1)$$

где $a_c(t)$ – амплитуда поля сигнальной составляющей, a_0 – амплитуда поля гетеродина, ω_0 – частота гетеродина, ω_c – частота сигнала, φ_0 – фаза гетеродина, $\varphi_c(t)$ – фаза сигнала. В случае разности $|\omega_0 - \omega_c| > 0$ образуется промежуточная частота, например из радиочастотного спектра. Такой прием оптического сигнала получил название «гетеродинный». В случае разности $|\omega_0 - \omega_c| = 0$ остается амплитудная составляющая, которая соответствует информационному сигналу, усиленному на величину амплитудной составляющей гетеродина. Такой прием оптического сигнала получил название «гомодинный». При этом информационное сообщение может быть закодировано в амплитудной составляющей и/или фазовой составляющей оптического излучения.

Опуская постоянный множитель, пропорциональный площади фотодетектора, учитывая соотношение между выходным током фотодетектора $i_\phi(t)$ и мощностью оптического сигнала $P(t)$ (параметр чувствительности $S[A/W]$)

$$I = S \times P = (\eta e/hf) \times P \quad (2)$$

выходной ток фотодетектора с учетом коэффициента умножения G (для лавинного фотодиода) можно представить в виде

$$i_\phi(t) = G \times S \{ P_c + P_0 + 2(P_c \times P_0)^{0.5} \cos[(\omega_0 - \omega_c)t + \varphi_0 - \varphi_c(t)] \} \quad (3)$$

В соотношениях 2 и 3 приведены обозначения: η – квантовая эффективность фотодетектора; e – заряд

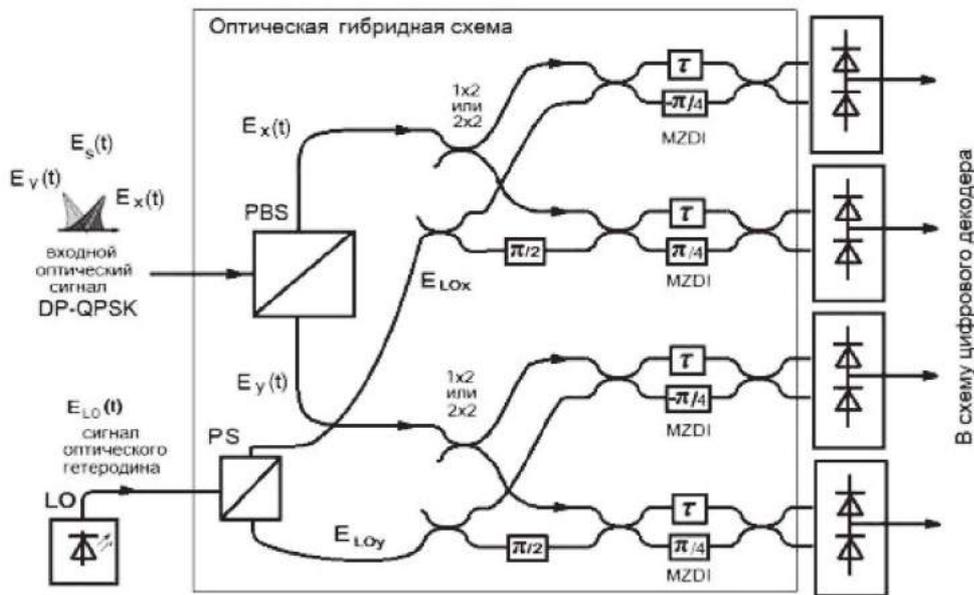


Рис. 9. Структура входной цепи простого когерентного приемника оптического сигнала и схема ее реализации в интегральной сборке

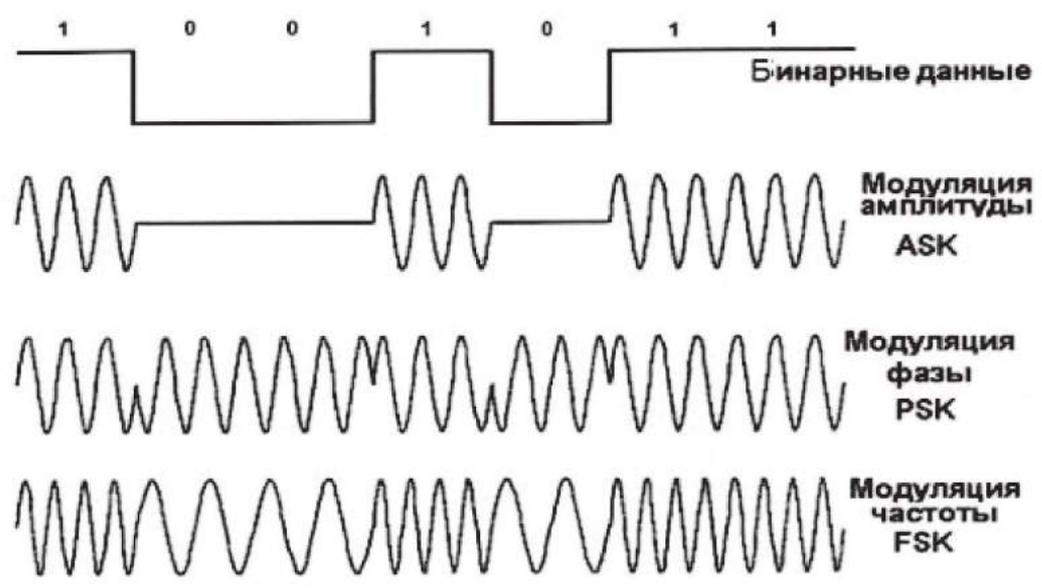


Рис. 10. Примеры форматов оптической модуляции

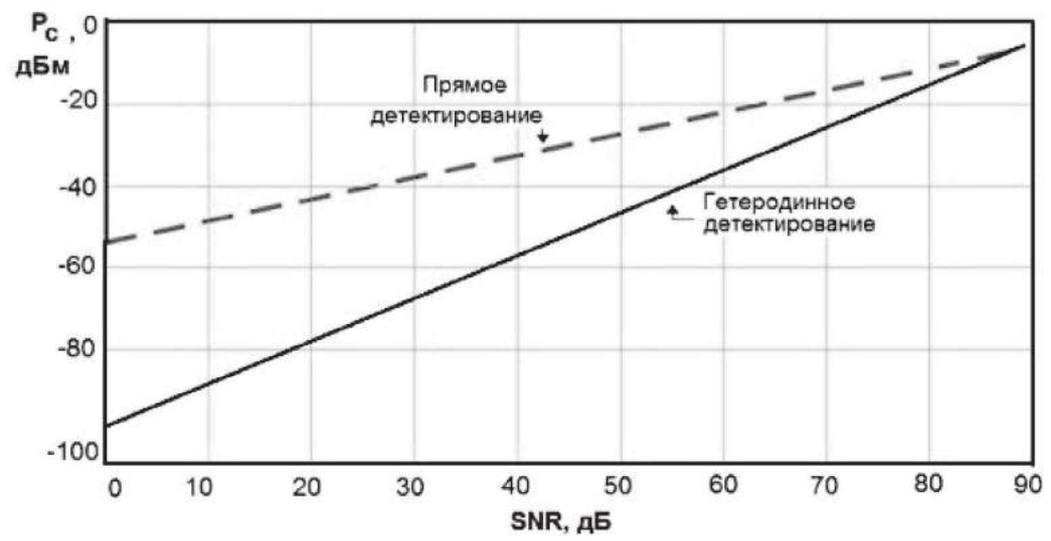


Рис. 11. Оценка выигрыша когерентного приема в оптической системе при заданных значениях отношения сигнал/шум (SNR)

электрона; h – постоянная Планка; f – линейная оптическая частота; P_c – мощность информационного сигнала; P_0 – мощность гетеродинного излучения.

Если использовать гетеродинный прием ($|\omega_0 - \omega_c| > 0$), тогда на выходе фотоприемного устройства устанавливается полосовой фильтр, настроенный на промежуточную частоту, и имеющий полосу пропускания для информационного сигнала. В этом случае мгновенное значение тока промежуточной частоты (переменная составляющая, т. к. постоянные составляющие отсекаются фильтром) будет равно

$$I_{\text{пч}}(t) = A \cos[2\pi f_{\text{пч}} t + \varphi_0 - \varphi_c(t)] \quad (4)$$

где

$$A = 2G \times S(P_0 \times P_c)^{0.5} \quad (5)$$

т. о. сигнальный ток ПЧ зависит от амплитуды, частоты и фазы несущей. Поэтому если любой из этих параметров модулируется информационным сигналом, то для демодуляции сигнала может быть использован любой хорошо известный метод радиоприема.

Если использовать гомодинный прием, то потребуется настроить частоты излучателей для выполнения равенства ($|\omega_0 - \omega_c| = 0$) и синхронизировать фазы.

Демодулированный сигнал в этом случае будет иметь на выходе фотоприемного устройства спектр, который сдвинут в область низких частот (область информационного сигнала).

Фототок на выходе фотодетектора определяется выражением

$$i_{\Phi}(t) = G \times S\{P_c + P_0 + 2(P_c \times P_0)^{0.5} \cos[\varphi_0 - \varphi_c(t)]\} \quad (6)$$

Если пренебречь постоянной составляющей, то на выходе фильтра низких частот будет получен сигнальный ток

$$i_c(t) = 2G \times S(P_c \times P_0)^{0.5} \cos[\varphi_0 - \varphi_c(t)] = A \cos[\varphi_0 - \varphi_c(t)] \quad (7)$$

Таким образом, при гомодинном приеме можно модулировать амплитудную составляющую, например, импульсной двоичной последовательностью со случайно чередующимися «1» и «0» ASK (Amplitude Shift Keying) при условии $\varphi_0 = \varphi_c$ и также фазовую составляющую φ_c (π , $\pi/2$, $\pi/4$ и т. д.), например, той же двоичной последовательностью PSK (Phase Shift Keying) при $\varphi_c = 0$ или ее фиксированном значении. Также возможна комплексная амплитудно-фазовая модуляция. При гетеродинном приеме также возможна частотная модуляция импульсными посылками FSK (Frequency Shift Keying) (рис. 10).

При когерентном приеме выигрыш перед прямым детектированием заключается в множителе P_0 , который позволяет в много раз увеличить величину фототока, т. е. повысить энергетический потенциал системы (рис. 11).

Как видно из рисунка, числовая оценка выигрыша от применения когерентного приема базируется на соотношении сигнала к помехам SNR (Signal Noise Ratio).

Гомодинный способ реализации когерентного приема имеет более высокую чувствительность, но требует жесткую частотную, фазовую и поляризационную стабилизацию квантовых генераторов, а это вполне реализуемо в настоящее время благодаря созданию новой оптической элементной базы. Не следует забывать также, что именно гомодинный прием позволяет реализовать не только амплитудную модуляцию оптического излучения, но и фазовые методы многопозиционной модуляции оптических сигналов (DPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK), поэтому у таких систем большое будущее.

Литература

1. Беккер Д., Мохр Д., Ри Кристоф Т., Джоши А. «Когерентный оптический приемник с управлением посредством обратной связи и с электронной компенсацией», патент 2008140162/09, 01.03.2007, Дискавери Семикондакторс, Инк. (US)
2. Величко, М. А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян // LIGHTWAVE Russian Edition. – 2005. – № 4. – С. 21–36.
3. Карих, Е. Д. Оптоэлектроника: конспект лекций / Е.Д. Карих. – Минск: БГУ, 2002. – 107 с.
4. Фокин, В. Г. Когерентные оптические сети: учебное пособие / В.Г. Фокин. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; кафедра многоканальной электросвязи и оптических систем, 2015. – 372 с.
5. Макаров, Т. В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи: Учебник / Т.В. Макаров. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.
6. Листвин, В. Н. DWDM системы: научное издание / В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков. – М.: Наука, 2013. – 267 с.

Модель системы управления параметрами линии радиосвязи на основе нечеткой логики

Model of radio communication link parameters control system based on fuzzy logic

Сорокин / Sorokin K.

Константин Николаевич

(vas-nic@yandex.ru)

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного», старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: когнитивная радиосистема – cognitive radio system; нечеткая логика – fuzzy logic; радиочастотный спектр – radio frequency spectrum; радиоэлектронная обстановка – radiofrequency environment; интеллектуализация управления – control intellectualization; эффективность – efficiency.

В статье представлена обобщенная модель когнитивной радиосистемы и структурная модель системы управления на основе нечеткой логики. На основе задаваемых требований выбраны входные данные и управляемые параметры, описан принцип принятия обобщенного решения на реконфигурацию системы. Применение искусственного интеллекта в системах управления позволит повысить эффективность функционирования сетями радиосвязи в сложной помеховой обстановке.

The article presents a generalized model of cognitive radio system and structural model of control system based on fuzzy logic. Based on the specified requirements, input data and controlled parameters have been selected, the principle of generalized solution for the system reconfiguration has been described. Application of artificial intelligence in control systems will improve the efficiency of radio communication networks in demanding interference environment.

Введение

Современный переход от постиндустриального общества к обществу знаний предполагает насыщение всех сфер деятельности человека системами с искусственным интеллектом и системами предоставления знаний [1]. Акцент на возможности непрерывного и повсеместного доступа к данным, информации и знаниям предполагает все большее распространение беспроводных сетей. Данное обстоятельство ведет к повышению спроса на радиочастотный спектр, возникают проблемы обеспечения информационного обмена с требуемым качеством в условиях сложной, динамически изменяющейся радиоэлектронной обстановки.

Одним из способов повышения эффективности функционирования систем радиосвязи является реализация интеллектуального управления параметрами, что реализуется в рамках концепции когнитивного радио. Особенностью CRS является применение элементов искусственного интеллекта, что позволяет анализировать окружающую обстановку, состояние самой радиосистемы и изменять свои эксплуатационные параметры в соответствии с целевыми установками и обучаться на основе полученного опыта [2].

Основой когнитивного радио является система управления, выполняющая функции анализа обстановки, состояния формируемого канала связи и управляющая эксплуатационными параметрами радиосистемы.

Модель системы управления когнитивного радио

Для реализации когнитивных функций применяются различные подходы. В последнее время большее распространение получили способы реализации искусственного интеллекта, основанные на применении нейронных сетей и нечеткой логики. Преимуществами нечеткой логики [3] является простота описания правил формирования заключений, возможность обучения за счет коррекции функций принадлежности и базы правил.

Обобщенная структурная модель когнитивной радиосистемы, построенной на основе нечеткой логики, представлена на рис. 1. Элементом системы, осуществляющим обработку входных данных и формирующим решения, является контроллер нечеткой логики, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Цель управления – обеспечение соответствия пропускной способности предоставляемого канала связи интенсивности поступающего от абонента трафика при соблюдении требований к качеству связи (по достоверности) [4].

Управляемыми параметрами в общем случае являются: рабочая частота, мощность передатчика, применяемая сигнально-кодовая конструкция. Данное решение основано на учете неоднородности помеховой обстановки

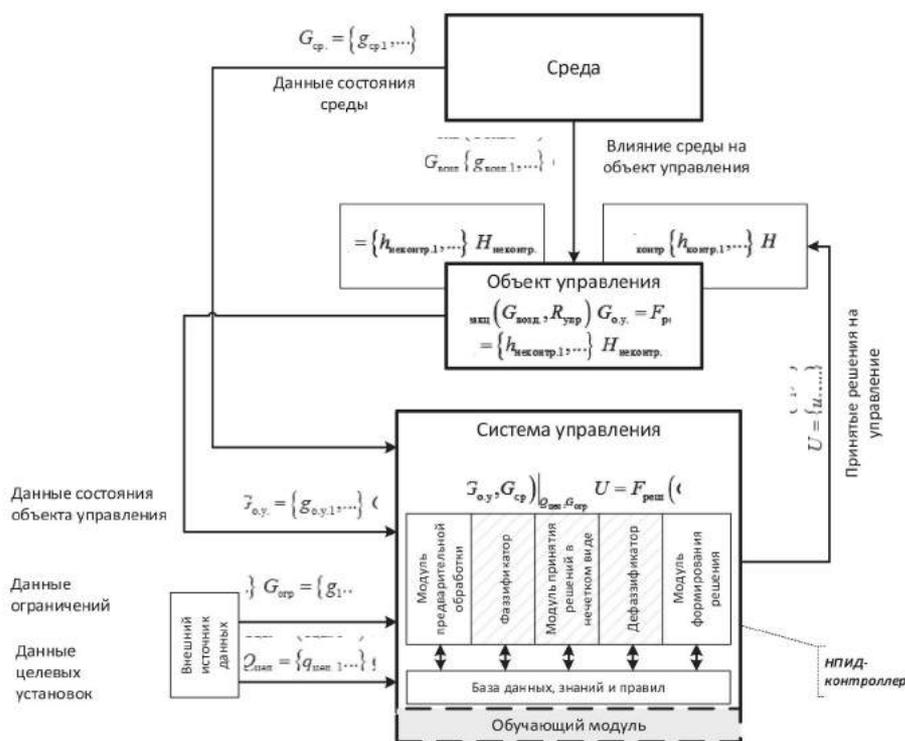


Рис. 1. Обобщенная структурная модель когнитивной радиосистемы на основе нечеткой логики

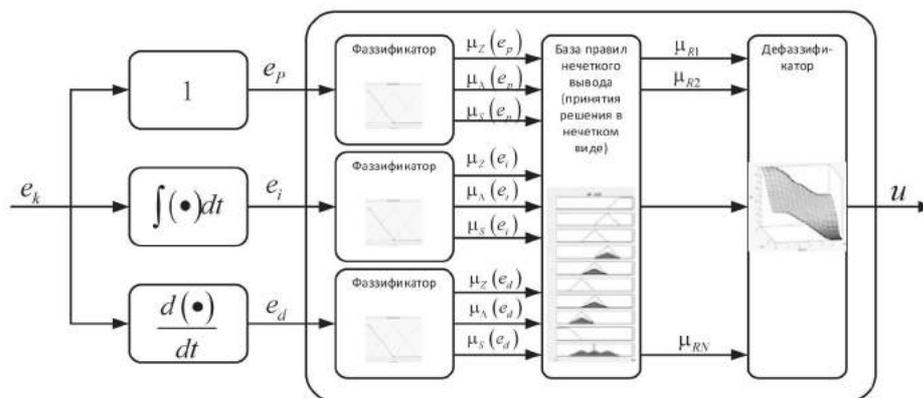


Рис. 2. Обобщенная структурная схема пропорционально-дифференциально-интегрального контроллера нечеткой логики (НПИД)

на различных частотах, зависимости мощности сигнала на входе приемника от частотного диапазона и характеристик среды распространения, пропускной способности канала связи от применяемой сигнально-кодовой конструкции и т.д. [5–7].

Предполагается, что рабочая частота радиосистемы лежит в пределах диапазона выделенных частот $f_p \in \{f_1, \dots, f_i\}$. Мощность передатчика ограничена диапазоном $P_{\text{прд}} \in [P_{\text{min}}; P_{\text{max}}]$, управление осуществляется непрерывно. Применяемые сигнально-кодовые конструкции (СКК) описываются множеством $Sg = \{Sg_1, \dots, Sg_S\}$. Сортировка СКК – в порядке возрастания обеспечиваемой информационной скорости. Каждому элементу множества сопоставлены:

- отношение сигнал/шум, при котором выполняется требование по достоверности передачи (γ_s);
- обеспечиваемая информационная скорость формируемого канала/линии связи (C_s), чем выше индекс – тем выше скорость.

При этом предполагается, что линия, развертываемая между подвижными абонентами, функционирует в условиях воздействия аддитивных шумов и помех, мощность которых распределена во времени по нормальному закону, а полоса частот, занимаемая сигналом при всех заданных СКК, постоянна. Генерируемый источником информации трафик разнородный, пульсирующий.

В соответствии с определением когнитивной радиосистемы [2], для принятия решения на реконфигурацию необходимы данные:

- об окружающей среде, заключающиеся в результатах оценки радиоэлектронной обстановки в точке приема;
- данные о состоянии системы, включающие текущую оценку качества линии связи (выраженную через отношение сигнал/шум на входе приемника);
- данные о текущих эксплуатационных параметрах;
- данные о предъявляемых требованиях со стороны абонента – интенсивность входящего трафика.

Принятие решение на реконфигурацию радиосистемы заключается в выборе рабочей частоты с наименьшим уровнем шумов и помех и такого сочетания сигнально-кодовой конструкции и мощности передатчика, которые бы обеспечили своевременную и достоверную передачу пользовательского трафика в сложившихся условиях эксплуатации.

Отражающая вышеуказанные тезисы система управления отображена на рис. 3

Функционирование системы управления заключается в выполнении последовательности действий, осуществляемых на основе анализа обстановки, состояния радиолинии и получаемой нагрузки:

- создание предпосылки для обеспечения связи с наилучшим качеством за счет выбора рабочей частоты с наименьшим уровнем шумов и помех [8, 9];
- определение сигнально-кодовой конструкции, наиболее соответствующей по обеспечиваемой пропускной способности интенсивности входящего трафика [11]);
- определение мощности передатчика, обеспечивающей требуемое отношение сигнал/шум на входе приемника при применяемой СКК;
- проверка принятых частных решений на адекватность и их коррекция в случае необходимости.

Анализ и принятие частных решений осуществляется на основе применения аппарата нечеткой логики. Принятие окончательного решения на реконфигурацию – проверкой частных решений на адекватность и, при необходимости, их коррекцией. Функции принадлежности на начальном этапе функционирования системы треугольные, применяется вывод по методу Ларсена и дефаззификация центроидным методом, что позволяет получать универсальную схему управления [10].

Выбор частоты осуществляется по результатам анализа помеховой обстановки, согласно рейтинга пригодности частоты для обеспечения связи. Оценка пригод-

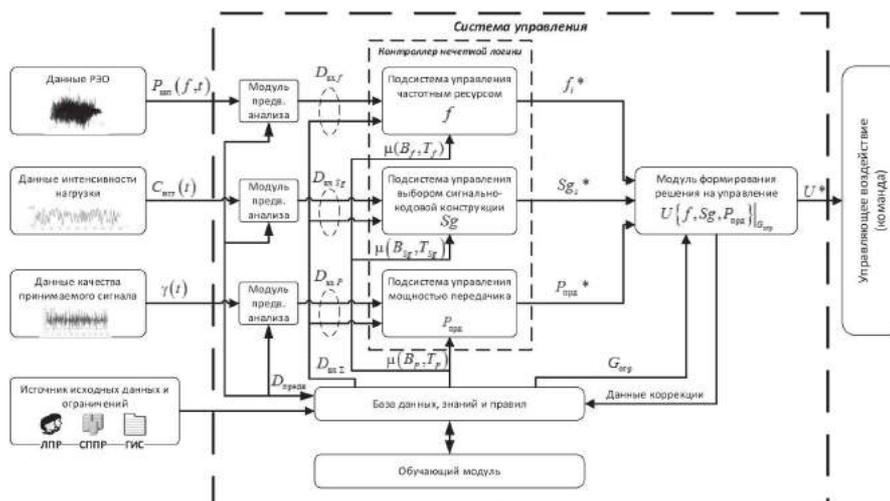


Рис. 3. Структурная модель системы управления когнитивной радиосистемы на основе нечеткой логики

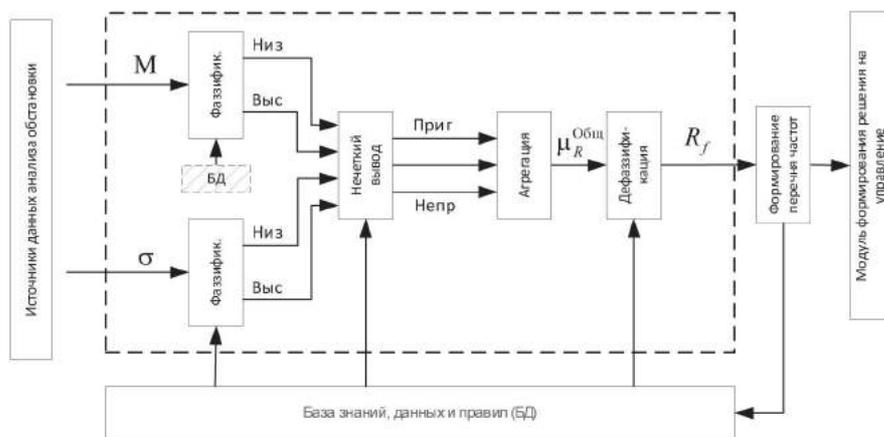


Рис. 4. Схема принятия решения по управлению частотой (присвоение рейтинга)

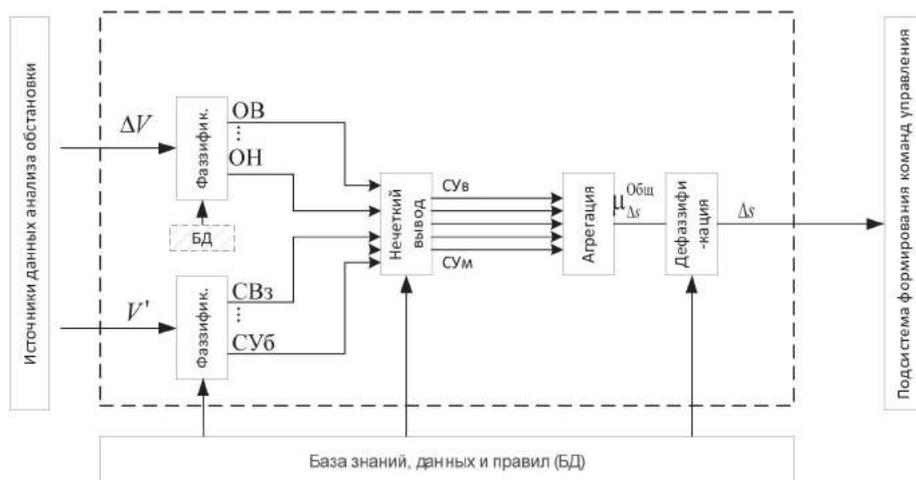


Рис. 5. Схема принятия решения на изменение индекса сигнально-кодовой конструкции

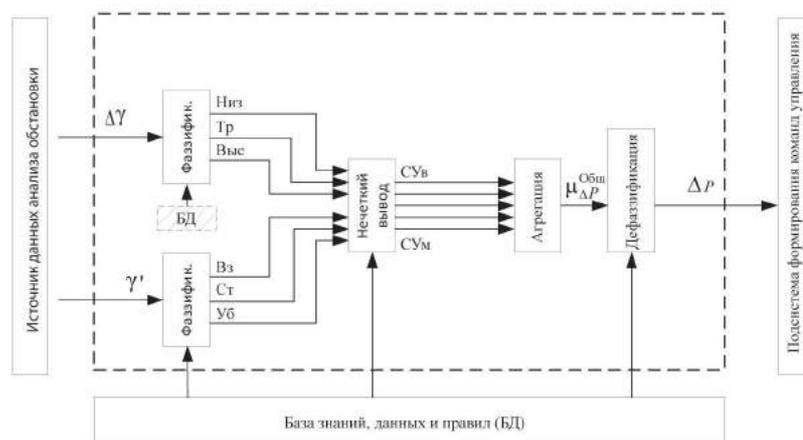


Рис. 6. Схема принятия решения по коррекции мощности передатчика

ности частотного ресурса производится по математическому ожиданию и среднеквадратическому отклонению мощности шумов и помех, вычисленным по J -му количеству измерений.

Определение наиболее пригодной СКК осуществляется на основе анализа расхождения текущей информационной пропускной способности сформированного канала связи и интенсивности входящего трафика.

Управление осуществляется инкрементно, дискретно, приращением индекса s сигнально-кодовой конструкции Sg_s . Анализ расхождения пропускной способности и интенсивности входящего трафика производится на основе оценки уровня заполнения буфера данных и динамики его изменения.

Мощность передатчика рассчитывается исходя из расхождения текущего отношения сигнал/шум и необходимого для обеспечения заданной достоверности передачи при выбранной СКК, а также динамики его изменения. Управление осуществляется инкрементно, непрерывно.

Применение нечеткой логики в данной модели позволяет принимать решение на реконфигурацию эксплуатационных параметров основываясь на логических выводах вида «если – то», проводить обучение системы управления изменяя количество термов и вид функций принадлежности, правила принятия решения.

Преимуществом данной модели является универсальность математического аппарата и сформированных схем принятия решения. Данное обстоятельство значительно упрощает разработку системы управления.

Отличие представленной модели от существующих – наличие комплексной системы принятия решения по нескольким разнотипным входным данным и ориентация системы управления на обеспечение оптимальной нагруженности канала связи. Оптимальность определяется необходимым и достаточным расходом ресурсов на обеспечение информационного обмена с заданным качеством. Модель инвариантна к частотному диапазону, количеству и виду применяемых сигнально-кодовых конструкций, типу передаваемого трафика. Модель обеспечивает ситуационное управление в условиях динамически меняющейся помеховой обстановки.

Результат моделирования системы при применении метода Ларсена для формирования частных решений показал, что:

- оценка частотного ресурса может уточняется за счет рассмотрения комплекса характеристик случайного процесса – помеховой обстановки, что дает выигрыш при определении мощности для выполнения требования по вероятности связи;
- управление выбором сигнально-кодовой конструкции позволяет экономить энергетический ресурс и улучшает ЭМС при снижении нагрузки в линии передачи;
- управление мощностью при применении пропорционально-дифференциального контроллера нечеткой логики позволяет говорить о проактивности процесса.

Вывод

Разработанная модель позволяет синтезировать интеллектуальную систему управления параметрами линии радиосвязи на канальном и физическом уровнях. Нечеткая система управления позволит повысить качество передачи информации между подвижными абонентами в условиях динамически меняющейся радиоэлектронной обстановки.

Литература

1. Малыгин, И. Г. Информационные технологии и искусственный интеллект – основные двигатели четвертой индустриальной революции (Industrie 4.0) / И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский // Информационные технологии. – 2016. – № 12, Т. 2. – С. 899–904.
2. Отчет МСЭ-R SM.2152. Определение системы радиосвязи с программируемыми параметрами (SRD) и системы когнитивного радио (CRS) // ITU. – Женева, 2010.
3. Гель, В. Э. Релизация когнитивной системы управления на основе аппарата нечеткой логики / В.Э. Гель, К.Н. Сорокин, А.К. Яковлев // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II Межвузовской научно-практической конференции. – СПб, 2017. – С. 204–208.
4. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник для вузов / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – 4-е-е изд. – СПб: Питер, 2010. – 944 с.
5. Комашинский, В. И. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирования / В.И. Комашинский, А.В. Максимов. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. – 176 с.
6. Песков, С. Н. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи / С.Н. Песков, А.Е. Ищенко // Теле-Спутник. – 2010, ноябрь. – С. 70–75.
7. Патшин, А. В. Способ увеличения пропускной способности узкополосной нестационарной радиолнии автоматизированной системы радиосвязи ВЧ-диапазона / А.В. Патшин, В.П. Кубанов, Ю.М. Сподобаев // Т-Comm. – 2012. – № 2. – С. 53–55.
8. Саид, М. А. Когнитивный подход к управлению радиочастотным спектром сети радиосвязи транспортных систем / М.А. Саид, О.А. Михалев, К.Н. Сорокин // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016. Материалы международной научно-практической конференции. Т. 2. – СПб, 2016. – С. 100–115.
9. Михалев, О. А. Управление радиочастотным спектром в когнитивной сети радиосвязи / О.А. Михалев, К.Н. Сорокин, М.Ю. Аванесов // Информация и Космос. – 2017. – № 1. – С. 57–66.
10. Ярушкина, Н. Г. Методы нечетких экспертных систем в интеллектуальных САПР / Н.Г. Ярушкина. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1997. – 107 с.
11. Комиссаров, С. А. Адаптивное нечеткое управление модуляцией сигналов в системах радиосвязи / С.А. Комиссаров, О.А. Михалев, К.Н. Сорокин // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Материалы II Межвузовской научно-практической конференции. – СПб, 2017. – С. 286–290.

Модель управления когнитивной декаметровой радиосетью

Control model of cognitive decameter radio network

Присяжнюк / Prisyazhnyuk A.

Андрей Сергеевич

(pas@itain.ru)

кандидат технических наук.

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

(Университет ИТМО),

доцент кафедры ГИС.

г. Санкт-Петербург

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.

Университет ИТМО,

заведующий кафедрой ГИС.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: когнитивная декаметровая радиосеть – cognitive decameter radio network; управление пакетной радиосетью – packet-radio network control; модель управления – control model; оперативная модель – operation model; зондовый контроль радиосети – radio network probing; эффективность радиосети – radio network efficiency.

Рассмотрены особенности радиосетей в декаметровом диапазоне частот. Предложена информационная модель управления когнитивной радиосетью в декаметровом диапазоне частот. Рассмотрена радиосеть общего пользования со сплошной зоной радиопокрытия больших территорий.

Specific characteristics of radio networks within decameter frequency range have been reviewed. Information model for control of cognitive radio frequency network within decameter frequency range has been proposed. Public access radio network with a contiguous long-distance radio coverage has been reviewed.

Радиосвязь в декаметровом (ДКМ) диапазоне частот используется для обеспечения уверенной передачи информации на больших территориях, особенно при стихийных бедствиях или в труднодоступных регионах, например крайнего севера, при оперативном резервировании других видов связи в случаях выхода из строя, связь на больших расстояниях с мобильными абонентами (самолетами, кораблями и др.). С помощью мобильных станций небольшой мощности связь в этом диапазоне во многих случаях имеет значительное экономическое и практическое преимущество перед другими видами связи. Особенно выделяются требования к живучести ДКМ сетей.

Радиосвязь в декаметровом диапазоне часто называют коротковолновой из-за длины волн от 10 до 100 метров. Распространяются короткие волны поверх-

ностной волной на десятки километров, а ионосферной волной – до тысяч километров.

Несмотря на развитие других видов связи, потребность в ДКМ радиосвязи растет, а частотная емкость ДКМ диапазона (1,5–30 МГц) ограничена. В связи с этим связь в ДКМ-сети организована по зонам, что позволяет многократно использовать частотный ресурс. Зона, как правило, представляет собой район земной поверхности с размерами 500*500 км.

Большое число декаметровых сетей радиосвязи различаются структурами (радиальные, кустовые, линейные, звездные, радиально-кольцевые и др.), числом каналов связи, скоростью передачи информации, размерами зон, дальностью действия, типами используемого оборудования, степенью автоматизации управления и другими показателями [1, 6].

Основными проблемами при передаче данных в ДКМ-сети являются сильная зависимость от состояния ионосферы земли, времени передачи информации, особенностей местности, а также наличия помех от других работающих радиостанций в декаметровом диапазоне частот.

Наличие мешающих факторов приводит к многолучевости, замираниям сигналов, наличию зон молчания, низкой скорости передачи данных и низкой надежности передачи данных в каналах связи.

Дальнейшим развитием декаметровых радиосетей является создание крупномасштабных сетей общего пользования с пакетной коммутацией, оперативно адаптирующихся к быстро меняющейся ситуации на сети [2], так называемых самоорганизующихся (когнитивные) ДКМ-сетей.

Когнитивная декаметровая сеть представляет собой интеллектуальную многопользовательскую сеть радиосвязи с процессом организации такого целенаправленного воздействия на ее элементы, в результате которого обеспечивается максимальная пропускная способность ДКМ-сети [3, 6, 7].

Рассмотрим предложенную в [2] крупномасштабную ДКМ-сеть радиосвязи со сплошной зоной радиодоступа.

Когнитивная сеть ДКМ-радиосвязи строится на основе применения когнитивных систем радиосвязи (использует их возможность изучать и адаптироваться к условиям ведения радиосвязи) [8, 9], а также адаптивной сетевой инфраструктуры (включая подсистемы интеллектуального радиодоступа и базовой сети с интеллектуальной системой оперативного управления).

Отличительная особенность когнитивной сети ДКМ-радиосвязи состоит в том, что в ней применяются технологии и оборудование, гарантирующее, что сеть, абонентские и сетевые устройства могут развертываться, функционировать и управляться (конфигурироваться, оптимизироваться, восстанавливаться и защищаться) в реальном масштабе времени. Сеть мультисервисная с пакетной коммутацией, приоритетным обслуживанием разнородного трафика от стационарных и мобильных терминалов радиодоступа.

Для обеспечения высокой автономной связности сети, унифицированные узлы ДКМ-сети размещаются с возможностью не менее трехкратного пересечения зон радиовидимости и используют односкачковые линии ионосферной связи. Такой подход к построению ДКМ-сети не требует мощных радиопередающих устройств [2].

Приемные устройства радиолиний оснащаются навигационными устройствами. Абонент, находящийся в области пересечения зон и на различных расстояниях от смежных узлов, будет иметь разные частоты доступа к этим узлам. Для таких абонентов частоты доступа к одному узлу не совпадают с частотами доступа

к другому узлу, и электромагнитная совместимость абонентских терминалов, находящихся в одном месте, но обращающихся к разным узлам, не ухудшается, общее число доступных каналов не уменьшается. Пересечение зон радиодоступа увеличивает вероятность доступа абонента хотя бы к одному узлу.

Таким образом, оптимальным размещением унифицированных базовых узлов, организуется сеть с высоким коэффициентом связности и достигается требуемый уровень пропускной способности ДКМ-сети (рис.1).

Модель управления такой ДКМ-сетью сводится к следующему – каждый узел по заданному суточному графику выполняет вертикальное зондирование ионосферы над узлом и наклонное зондирование по заданной группе азимутов вокруг узла. По результатам зондирования формируется карта текущего распределения критических частот над всей зоной радиодоступа сети и адаптируется структура базовой сети и сетей радиодоступа в зонах [8].

В когнитивных ДКМ-сетях предусматривается осуществление распределенного децентрализованного оперативного управления, основанного на взаимодействии сетевых устройств с целью максимизации пропускной способности и живучести ДКМ-сети.

Объектами управления являются те элементы ДКМ-сети, состояние которых представляет интерес и на которые можно воздействовать целенаправленно, т.е. управлять ими (магистральные адаптивные радиолинии, коммутаторы пакетов в узлах, фазированные антенные устройства, устройства радиодоступа и др.) [9].

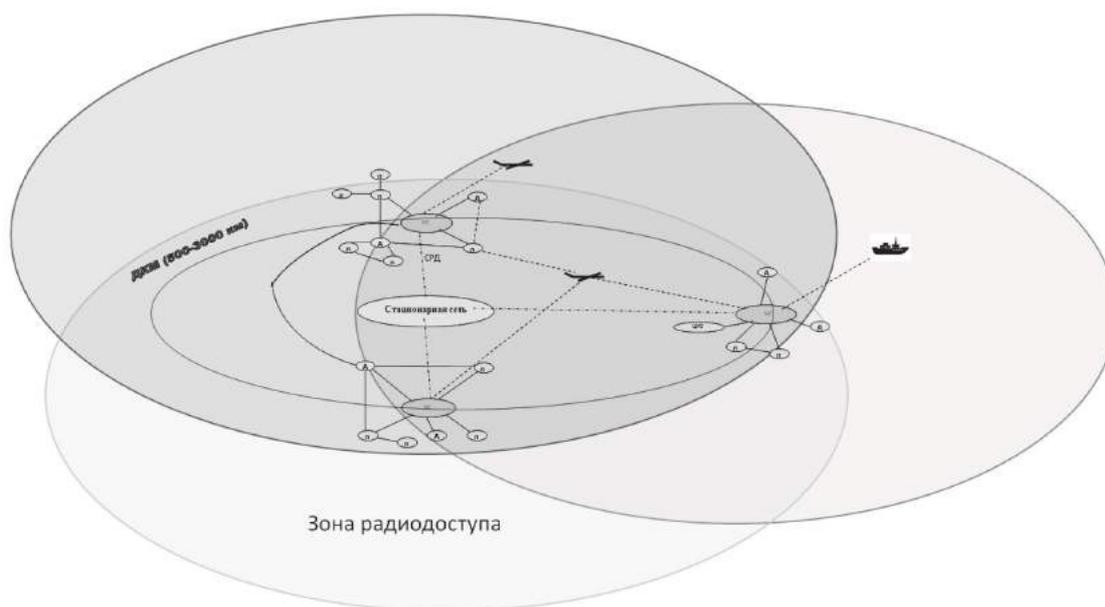


Рис. 1

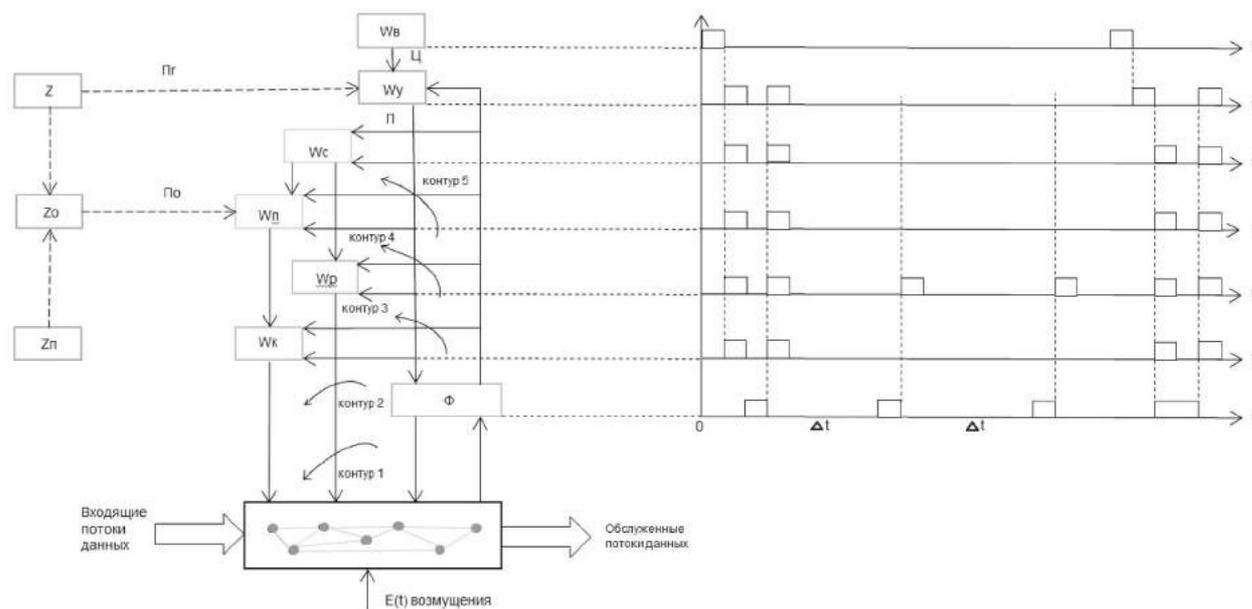


Рис. 2. Операторная схема модели управления ДКМ-сетью

Система управления ДКМ-сетью представляет собой иерархическую систему, на каждом уровне которой реализуются несколько функций управления: определение целей управления, планирование, оперативное управление, включая функцию контроля анализа и координации (рис. 2).

Управление здесь сводится к выявлению критических ситуаций и выработке оптимальных решений в них. Такой подход требует сбора в каждом узле базовой сети значительной информации о сложившейся ситуации, для чего необходима совершенная система контроля за ситуацией в ДКМ-сети. Кроме того, нужна оптимальная модель управления.

Введением в оперативное управление пакетной ДКМ-сетью элементов программного управления, таких как оперативного плана изменения структуры сети Π_c и оперативного плана управления потоками данных Π_n , а также динамического управления маршрутизацией достигается квази оптимальное управление.

В общем случае управление определяется как

$$V_{t+1} = W(V_p, \Pi_c, \Pi_n, T, C, B), \text{ при } B \rightarrow \max,$$

где W – оператор рекуррентного оперативного управления,

V_p, T, C, P – значения управляемых параметров и измеренные значения функционалов T_p, C_p, P_t в момент времени t ,

T – вектор средних времен доведения пакетов между корреспондирующими парами абонентов,

C – вектор разрешенной к использованию в каналах связи скоростью передачи данных,

B – пропускная способность сети.

Пропускная способность пакетной ДКМ-сети определяется как максимальное количество пакетов, переданное по сети за заданный интервал времени между всеми корреспондирующимися парами абонентов с требуемым качеством обслуживания при заданной матрице тяготений и фиксированной структуре сети.

Оператор управления W имеет иерархическую структуру и представляет кортеж:

$$W = \langle \Phi, W_b, W_y, W_n, W_c, W_p, W_k, Z, Z_o, Z_n \rangle,$$

где Z, Z_o, Z_n – операторы зондирования ионосферы постоянного (наклонного), оперативного (вертикального) и пассивного,

Φ – подоператор сетевого зондового контроля состояния ДКМ-сети;

W_b – подоператор организационного управления;

W_y – подоператор планирования;

W_c – подоператор оперативного управления структурой сети (оперативного планирования);

W_n – подоператор управления потоками данных;

W_p – подоператор управления маршрутизацией;

W_k – подоператор управления безопасностью информации и радиодоступа в зоне.

Операторная схема модели управления ДКМ-сетью показана на рис. 2.

Подоператоры W_b, W_y, Z находятся в центре управления сетью, а подоператоры $W_c, W_n, W_p, W_k, Z_o, Z_n$ – на каждом узле базовой сети, обеспечивая децентрализованное оперативное управление ДКМ-сетью.

На верхнем уровне W_b устанавливаются цели, требования к качеству обслуживания и структуры взаимодействия подоператоров. В W_y синтезируется структура

Таблица 1

Тип структуры сети	Нагрузка. Общее время занятия каналов зондами, усл. ед.		Время контроля состояния сети, усл. ед.	
	Метод безадресного зондирования	Одноадресный метод	Метод безадресного зондирования	Одноадресный метод
Радиальная	$2N - 2$	$N^2 - N$	2	$2N - 2$
Кольцевая: при $N = 2n$	$4n$	$5N^2 - 2$	$2n$	$2n^2$
при $N = 2n+1$	$4n + 2$	$5N^2 - n$	$4n + 2$	$2n^2 - n$
Радикально-кольцевая	$5N - 5$	$3N^2 - 7N + 4$	3	$2N - 2$
Полносвязная	$2N^2 - 5N + 3$	$N^3 - 4N^2 + 7N - 4$	3	$2N - 2$

сети и разрабатывается план изменения структуры сети. Для этого используются результаты наблюдения за ионосферой службой ионосферного зондирования Z , которой определяются рабочие частоты в зонах обслуживания, матрицы тяготений потоков в сети и требования к качеству обслуживания.

На оперативном уровне в подоператоре W_c формируется оперативный план управления структурой P_c при заданной структуре сети, матрице тяготений потоков данных и ситуации на сети.

В процессе функционирования сети оператором Z_o контролируется помеховая обстановка, с учетом которой в W_n формируется план управления потоками данных в ДКМ-сети (ограничение нагрузки на сеть, управление потоками данных при передаче по адаптивным каналам связи).

В операторе W_p реализуется процедура маршрутизации и коммутации пакетов в ДКМ-сети, при этом используется как статическое, так и динамическое управление маршрутизацией с помощью сетевых зондовых методов маршрутизации [3, 4, 5].

Вопросы обеспечения безопасности информации и связи реализуются в подоператоре W_k . Подоператор сетевого зондового контроля состояния ДКМ-сети Φ выполняет функции «нервной» системы когнитивной ДКМ-сети.

Подоператор Φ в результате «наблюдения» за состоянием ДКМ-сети отображает его в матрицу оценки

состояния, которую используют все подоператоры управления $\langle W_y, W_n, W_c, W_p, W_k \rangle$ при выборе управляющих воздействий на ДКМ-сеть (объект управления). Оператор Φ строится на принципах зондирования сети контрольными пакетами данных, которые специальным образом пробегая по ДКМ-сети, формируют реальный оптимальный план распределения потоков данных в маршрутизаторах ДКМ-сети в реальном масштабе времени, максимизируя пропускную способность $\{\max P\}$ ДКМ-сети.

Диаграмма взаимодействия подоператоров в процессе функционирования оператора управления ДКМ-сетью W представлена на рис. 2. Статические периоды управления ДКМ-сетью отражены интервалами времени Δ . Каждый подоператор предложенной модели управления ДКМ-сетью имеет право инициировать работу подоператора Φ .

Результатами сетевого зондирования контрольными пакетами пользуются все подоператоры оператору W . Установленными правилами взаимодействия подоператоров управления в данной модели управления регулируется загрузка сети служебной информацией. В работах [4, 5] доказана эффективность безадресных методов зондирования перед адресными. Для типовых структур в таблице 1 приведены результаты сравнения, где N – количество узлов связи в ДКМ-сети [10].

Результаты получены в предположении, что в сети циркулируют зонды (пакеты) фиксированной длины,

каналы дуплексные, время передачи зонда по каналу равно условной единице времени.

Анализ верхних (неулучшаемых) оценок оперативности сбора полной информации о состоянии сети в узле-инициаторе зондирования и ресурсоемкости, определенной в зондо-занятиях каналов связи, показывает очевидное преимущество безадресного зондирования пакетной ДКМ-сети.

В работах [4, 5] предложен безадресный метод, обеспечивающий полной информацией о состоянии сети за один цикл зондирования всех узлов сети произвольной структуры с любого узла сети. Данное свойство обеспечивает максимальную живучесть сети при ее деградации или наращивании.

Предложенная модель управления когнитивной пакетной ДКМ-сетью реализует рациональным способом дифференциацию функций управления. Соотношение темпов управления в каждом контуре управления на каждом шаге должно быть таким, чтобы на каждом шаге структурных изменений происходил весь цикл управления потоками как внешними, так и внутренними. В этом случае достигается максимальная эффективность управления, что приводит к устойчивому функционированию ДКМ радиосети в чрезвычайных ситуациях и обеспечивает требуемую пропускную способность.

Литература

1. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / под ред. О.В. Головина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 598 с.
2. Пат. № 2619471 Российская Федерация, МПК Н04В 7/00. Крупномасштабная сеть ДКМВ радиосвязи со сплошной зоной радиодоступа / А.Е. Андреечкин [и др.]; патентообладатель С.П. Присяжнюк; № 2016110932; заявл. 24.03.2016; опубл. 16.05.2017, Бюл. 14.
3. Присяжнюк, С.П. Пакетная радиосвязь / С.П. Присяжнюк, В.И. Комашинский // Информация и Космос. Спецвыпуск – 2009. – № 5. – 132 с.
4. Аванесов, М.Ю. Оперативное управление потоками данных в мультисервисных сетях связи / М.Ю. Аванесов, С.П. Присяжнюк. – СПб.: Изд-во балт. гос. техн. ун-та, 2007. – 87 с.
5. Пат. № 2574814 Российская Федерация: МПК Н04L 12/70 Способ оперативного управления потоками данных в сетях с коммутацией пакетов / С.П. Присяжнюк, М.Ю. Аванесов; заявитель и патентообладатель ЗАО «Институт телекоммуникаций». – № 2014133011/08; заявл. 12.08.2014; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4.
6. Синсер, Р. Архитектура связи в распределенных системах [пер. с англ.] / Р. Синсер. – М.: Мир, 1981. – 1127 с.
7. Моделирование процесса информационного обмена в тракте передачи данных из совокупности параллельных декаметровых каналов / В.А. Цымбал [и др.] // Технологии информационного общества. X Международная отраслевая научно-техническая конференция: Сборник трудов, 2016. – С. 79.
8. Комплекс определения области ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями по данным GPS-мониторинга / В.П. Пяменцев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 941.
9. Анализ моделей затухания радиосигналов дециметровых волн / С.В. Дворников [и др.] // Информация и Космос. – 2018. – № 2. – С. 6–12.
10. Аванесов, М. Ю. Модель оценивания служебной информации в пакетной сети / М.Ю. Аванесов // Информация и Космос. – 2001. – № 2. – С. 36–38.

Информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00*)

Информатика, вычислительная техника и управление

- 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

* 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 19.01.2012 N 5)

Исследование метода эмпирической модовой декомпозиции в задаче анализа сигналов акустической эмиссии

Investigation of empirical mode decomposition method in the scenario of acoustic emission signals analysis

Дюк / Diuk V.

Вячеслав Анатольевич

(v_duke@mail.ru)

доктор технических наук.

ФГБУН Институт проблем транспорта

им. Н. С. Соломенко (ИПТ) РАН,

главный научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

Комашинский / Komashinsky V.

Владимир Ильич

(kama54@rambler.ru)

доктор технических наук, доцент.

ИПТ РАН, заместитель директора по научной работе.

г. Санкт-Петербург

Малыгин / Malygin I.

Игорь Геннадьевич

(malygin_com@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ИПТ РАН, директор.

г. Санкт-Петербург

Сенкевич / Senkevich Yu.

Юрий Игоревич

(yury.senkevich@gmail.com)

доктор технических наук, доцент.

ФГБУН Институт космофизических исследований

и распространения радиоволн ДВО РАН,

ведущий научный сотрудник.

Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка

Аванесов / Avanesov M.

Михаил Юрьевич

(avanesov@itain.ru)

кандидат технических наук.

ЗАО «Институт телекоммуникаций»,

научный секретарь.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: эмпирическая модовая декомпозиция – empirical mode decomposition; анализ сигналов – signal analysis; акустическая эмиссия – acoustic emission.

Приведен краткий обзор существующих методов первичного преобразования нестационарных сигналов. Отмечены недостатки традиционных методов. На примерах анализа сигналов акустической эмиссии показаны преимущества метода эмпирической модовой декомпозиции Хуанга. Полученные результаты продемонстрировали богатую палитру возможностей метода эмпирической модовой декомпозиции.

The existing methods of non-stationary signals primary conversion have been briefly reviewed. Disadvantages of the existing methods have been pointed out. Based on the examples of acoustic emission signals, the advantages of Huang empirical mode decomposition method have been shown. The results obtained have demonstrated a high potential of empirical mode decomposition method.

Вопросы поиска устойчивых маркеров сейсмических событий на основе анализа сейсмических сигналов, несмотря на свою достаточно долгую историю изучения, постоянно находятся в поле внимания исследователей. Наиболее значимые результаты здесь были получены в области предсказания землетрясений [1, 2]. При этом в основном рассматривался сверхнизкочастотный диапазон акустических колебаний, лежащий ниже 10 Гц [3, 4]. Вместе с тем в последние годы обратили на себя внимание работы по изучению сигналов более высокого диапазона колебаний (от 20 Гц до 10–16 кГц), наблюдаемых в приповерхностном слое Земли и связанных с физическими процессами пластической деформации. Такие акустические сигналы известны как сигналы акустической эмиссии (САЭ) [5].

Предварительные исследования свидетельствуют, что динамические показатели группового поведения импульсов САЭ и морфологические особенности их строения указывают на повышение вероятности возникновения сейсмического события. Было показано, что по амплитудно-частотному составу сигнала САЭ с определенной точностью можно определять масштаб

порождающего сигнал источника колебаний и оценить расстояние от него до пункта регистрации [6, 7].

САЭ, в силу своего физического происхождения, представляют хаотическую последовательность импульсов разной амплитуды, частоты внутреннего наполнения, также вероятности их появления за эпоху наблюдения. Причем было обнаружено значительное разнообразие паттернов импульсов САЭ [8] и значительные градиенты фоновой активности. Статистические оценки параметров САЭ характеризуют рассматриваемые сигналы как нестационарные, то есть такие, у которых математическое ожидание, дисперсия и корреляционные характеристики заметно меняются во времени. Кроме того, наблюдаемые на практике САЭ воспринимаются на фоне шумовых помех, порождаемых погодными факторами и другими атмосферными явлениями, а также присутствием источников шума искусственного происхождения, которые независимо несут нестационарный характер. В результате процесс выделения полезного сигнала становится нетривиальной задачей.

Успех получения полезной информации из временных рядов (ВР) САЭ зависит от качества преобразования, позволяющего разделить его на полезную (целевую) и сопутствующую¹ составляющие. Наиболее часто в случае принятия стационарной модели ВР используются фильтры (сглаживающие, медианные, Баттерворта, Чебышева и др.) и при стремлении существенно снизить зашумленность ВР их применение приводит к значительному искажению формы полезного сигнала. Стратегия оптимальной фильтрации Колмогорова-Винера успешно функционирует, когда свойства как сигнала, так и шума заведомо известны. Для качественной фильтрации Калмана необходимо опираться на представлении о ВР как функции с линейным стохастическим распределением предсказываемых состояний. По существу, рекурсия алгоритма фильтра Калмана тянет за собой след предшествующего состояния, которая и вносит значимые искажения в преобразованный ВР. В геофизике последнее десятилетие получила распространение очистка от шумов сейсмических и произвольных периодических сигналов с помощью вейвлет-преобразования данных с последующим исключением из вейвлетного спектра шумовых уровней разложения [9, 10]. Но и в этом случае интуитивный подбор вейвлет-базисной функции является неизбежной причиной искажения формы искомого ВР.

Все перечисленные выше методы анализа ВР имеют общий серьезный недостаток, а именно, качество получаемых результатов анализа жестко зависит от правильного выбора начальных параметров каждого конкретного метода, таких как подбор границ и крутизны фронтов фильтра, формы его АЧХ в полосе пропускания и вне ее, выбора базисных функций спектрального разло-

жения, формы применяемого вейвлета, размера окна, шага масштабирования, задания функции окна и т. д. Иначе говоря, возникает необходимость использовать для каждого конкретного исследования априорную информацию об анализируемом ВР. Для нестационарных природных сигналов, к которым в частности относятся и САЭ, такая информация, как правило, отсутствует.

В этом смысле несомненный интерес представляют методы, основанные на эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД), предложенной в 1998 г. Н. Хуангом [11]. В России наиболее известны применения метода ЭМД для очистки медленно меняющихся геофизических сигналов от фоновых помех [12]. Метод ЭМД отличается тем, что не использует априорный базис и не требует осуществлять подбор внутренних параметров преобразования. Использование ЭМД для выделения импульсов САЭ является предметом настоящего исследования.

Задача исследования формулируется как выделение шаблонов информационно значимых морфологических форм импульсов САЭ. Получение таких шаблонов импульсов САЭ требуется не только для построения оптимальных фильтров, но и для создания реестра морфологического многообразия форм для проведения дальнейших углубленных исследований по поиску связей между такими формами и состояниями среды их порождающей.

Метод ЭМД основан на процедуре определения огибающей ВР с последующим итеративным вычислением огибающей нового ВР, в качестве которого используется огибающая ВР, полученная на предыдущем этапе вычислений. Совокупность получаемых огибающих ВР принимается за собственный неортogonalный базис. Манипуляции с ВР САЭ основаны на следующей аддитивной модели:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t),$$

где временной ряд $u(t)$ представлен смесью определенного числа мод $c_i(t)$ и остаточного ряда $r_n(t)$. Каждая из этих мод принимается как базисная функция. Причем каждой из мод можно приписать некоторый реальный физический процесс, составляющий анализируемый ВР. Получаемые моды необязательно ортогональны друг другу и отражают особенности исходного ВР на всех его локальных участках. Метод ЭМД однозначным образом разбивает любой временной ряд $u(t)$ длины N на компоненты, называемые характеристическими модовыми функциями (*Intrinsic Mode Functions – IMF*). Получение мод достигается применением следующего базового алгоритма [13]:

¹ Здесь намеренно говорится о сопутствующей составляющей не как о помехе, поскольку она сама по себе представляет предмет отдельного исследования.

1. Поиск всех локальных точек экстремума для данного ВР $u(t)$.

2. Вычисление с помощью сплайнов интерполяции двух огибающих кривых, проходящих, соответственно, через максимумы и минимумы анализируемого ряда. Обозначим верхнюю огибающую кривую (проходящую через максимумы) – U , нижнюю огибающую кривую (проходящую через минимумы) – L .

3. Вычисление среднего значения верхней и нижней огибающих

$$m = \frac{U + L}{2}.$$

4. Получение остатка вычитанием

$$r = u(t) - m.$$

5. Проверка критерия отсеивания (**sifting process**) и, при его невыполнении, применение процедур 1–4 для остатка ВР $u(t) = r$.

6. Полученный после отсеивания остаток r принимается за найденную компоненту $c_i(t) = r$, где i – номер компоненты или число пройденных циклов алгоритма EMD.

7. Вычитание из исходного ВР $u(t)$ найденной компоненты $c_i(t)$. Полученный остаток становится новым ВР для декомпозиции

$$u_i(t) = u(t) - c_i(t).$$

8. Проверка, является ли новый ВР монотонной функцией или удовлетворяет определенным заданным условиям. При положительных результатах проверки, декомпозиция завершается. Иначе – полученный ВР используется в качестве исходного, весь алгоритм декомпозиции повторяется уже для него. ВР, полученный на последнем шаге данного алгоритма, является остаточной компонентой $r_n(t)$. В связи с тем, что сама процедура отсеивания остатка должна быть конечной, Хуанг предложил использовать для этого так называемый остановочный критерий (*stoppage criterion*). На практике многие исследователи ограничиваются более простым правилом остановки алгоритма. Десяти и даже менее итераций хватает для получения компонент со свойствами, близкими к характеристическим модовым функциям IMF [10].

Для начальной проверки работоспособности разработанной компьютерной программы был использован тестовый сигнал, представленный суммой синусоидальных сигналов с относительными некратными частотами $f_1=125, f_2=73, f_3=37, f_4=14$, частотой дискретизации 4096 и длиной выборки в 4096 отсчетов.

Для эффективной декомпозиции этого искусственного временного ряда оказалось достаточно вычислить четыре моды – они соответствуют просуммированным синусоидальным сигналам. Пятая мода характеризуется малым значением дисперсии – 0,045 и поэтому может быть исключена.

На следующем этапе проверки программы метода ЭМД генерировались импульсные сигналы, по морфо-

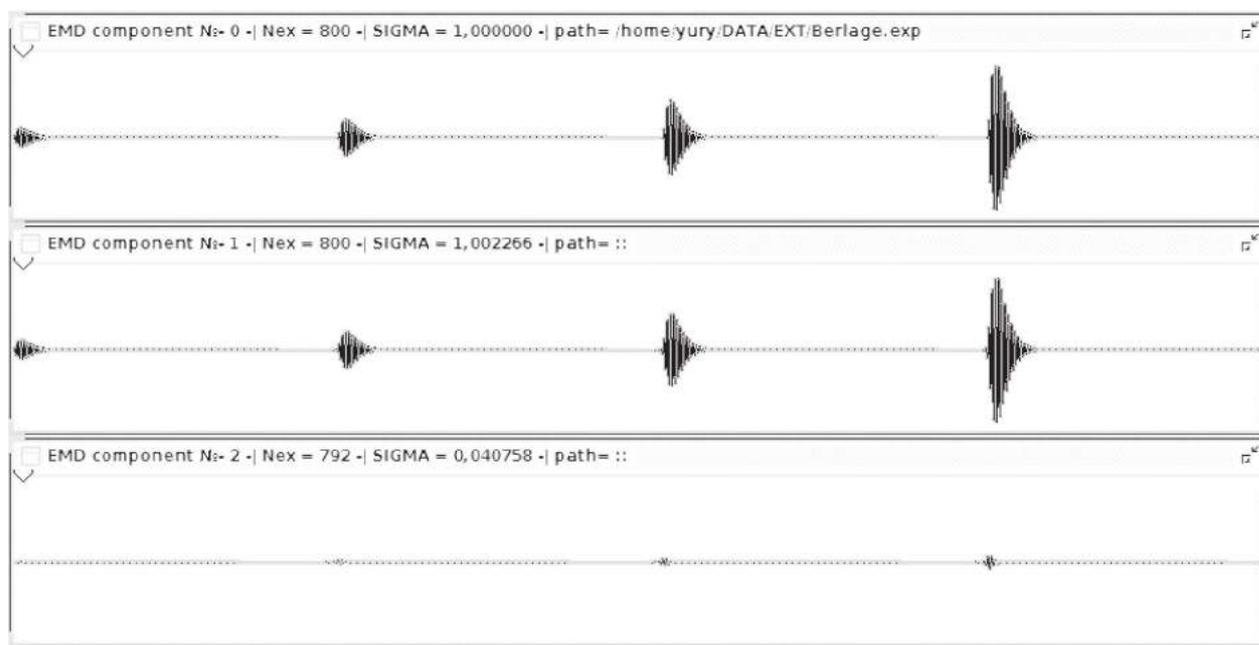


Рис. 1. Результаты тестирования компьютерной программы, реализующей метод ЭМД (описание в тексте)

логической структуре близкие к реальным импульсам, составляющим САЭ. Эти сигналы описываются функциями Габора и Берлаге [14, 15]. В нашем эксперименте были использованы импульсы с законом модуляции Берлаге.

$$b(t) = A \cdot t^\alpha \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(2\pi ft).$$

Для наглядности амплитуда каждого последующего импульса увеличивалась вдвое. Остальные параметры следующие: амплитуда $A = (1, 2, 3, 4)$, частота модуляции $f = 0.1$, коэффициенты скорости нарастания и спада $\alpha = 1.2$, $\beta = 0.05$, длительность ВР $0 - T = 1000$.

На рис. 1 представлены результаты применения ЭМД для исходного ВР, который отображен в верхнем окне компьютерной программы. В окнах ниже видно, что уже первая мода незашумленного сигнала в точности повторяет исходную импульсную последовательность, а остальные моды (отображена только вторая мода) несут ничтожно малую энергию и являются следствием выбранной функции сплайновой аппроксимации.

Следующая часть нашего экспериментального исследования заключалась в оценке качества восстановления серии искусственных импульсных сигналов Берлаге при зашумлении исходного ВР. В качестве аддитивного шума, накладываемого на исходный ВР, был использован сигнал генератора случайных чисел математической библиотеки среды программирования Eclipse (*java.util.Random. Autor Frank Yellin. Ver.1.0*). Параметры сигнала и шума (помехи) представлены в табл. 1. Расчет значений отношений сигнал-шум вычислялся по стандартной формуле:

$$SN(dB) = 20 \lg(\sigma_s / \sigma_n).$$

где σ_s и σ_n – среднеквадратичное отклонение амплитуды сигнала и шума соответственно.

Проведенное компьютерное моделирование показало, что структура паттерна исходных импульсных сигналов Берлаге хорошо восстанавливается вплоть до отношения сигнал-шум -6 dB. Метод ЭМД позволяет успешно выделять полезный импульсный сигнал из шума с нормальной функцией распределения вероят-

ности. Для этого достаточно выполнить итеративный алгоритм всего лишь до уровня третьей моды. Энергия четвертой и последующих мод составляет менее 2% от общей энергии искусственного сигнала.

В ходе исследования проводилась сравнительная оценка результатов применения метода ЭМД и других процедур фильтрации искусственных сигналов в интересах выделения и восстановления структуры их паттернов. Эквивалентом искомой структуры паттернов, как и ранее, принимались результаты морфологического изучения сигналов САЭ, которые были получены в лаборатории акустических исследований ИКИР [5]. На рис. 2 приведена иллюстрация одного из результатов применения ЭМД (показаны три первые моды) и процедуры скользящего весового сглаживания косинусным окном с размерностью 8, 32 и 64 отсчета соответственно. Верхнее окно (1) и верхнее окно (2) программы на рис. 2 демонстрируют результат смешивания импульсов Берлаге и шума с отношением -6 dB. Очевидно, что увеличение размера окна усреднения не приводит к восстановлению структуры паттерна исходных импульсов Берлаге (часть 2 рис. 2) в отличие от второй моды части 1 рис. 2. При этом применение ЭМД позволяет заметно увеличить отношение сигнал-шум.

Заключительный этап исследования включал применение метода ЭМД к реальным сигналам САЭ. Для тестирования отбирались фрагменты измерений, на которых САЭ проявляли различные свойства – редкие одиночные импульсы САЭ, группа импульсов различной амплитуды, импульсы, искусственного происхождения, вызванные пролетом вертолета. Полученные результаты продемонстрировали богатую палитру возможностей метода ЭМД. Проведенные эксперименты по использованию метода ЭМД для обработки и анализа САЭ подтвердили ранее высказанные идеи и гипотезы о структурном многообразии форм, составляющих эти сигналы.

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

Таблица 1.

Параметры аддитивной смеси сигнала и шума и их отношения

Номер эксперимента	(1)	(2)	(3)	(4)
Мат. ожидание сигнала	-0.012	-0.006	-0.003	-0.001
СКО сигнала	57.661	28.637	14.241	7.217
Мат. ожидание помехи	0.113	-0.351	-0.164	0.268
СКО помехи	28.648	28.507	28.632	29.003
SN(dB)	6.078	0.039	-6.066	-12.081

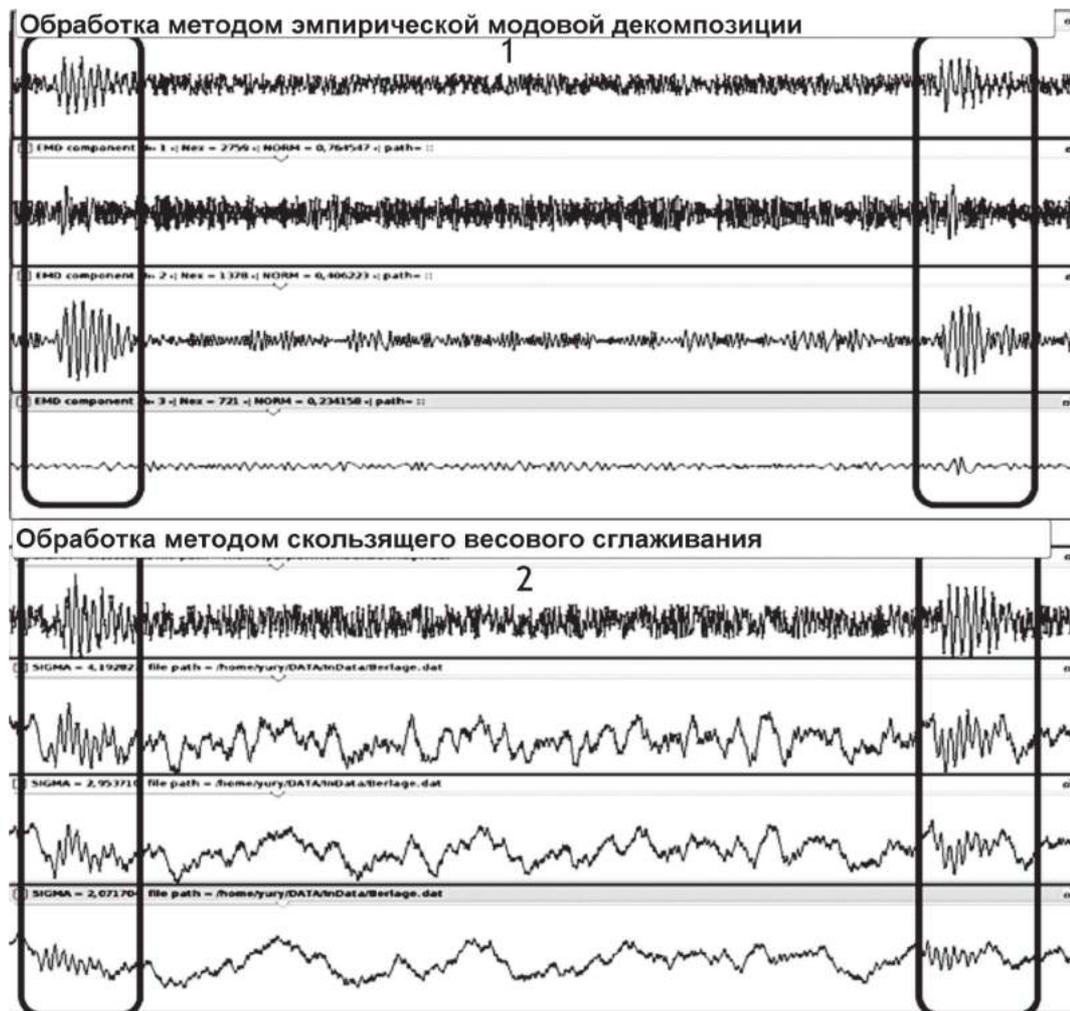


Рис. 2. Отображение результата сравнения применения ЭМД и процедуры взвешенного усреднения к аддитивной смеси пары импульсов Берлаге и шума

1. Произведён краткий обзор существующих методов первичного преобразования временных рядов применительно к нестационарным сигналам, указывающий на серьезные искажения, которые вносят традиционные методы очистки сигналов от шумов в структуру паттернов искомых сигналов, то есть происходит необратимое искажение тонкой структуры искомых сигналов.

2. Проанализирована принципиальная возможность применения ЭМД для выделения и восстановления импульсных сигналов САЭ.

3. Численным экспериментом показано положительное качественное отличие результатов применения алгоритма очистки сигналов от шумов на базе неполной декомпозиции Хуанга. Метод ЭМД позволяет успешно выделять полезный сигнал из шума и восстанавливать структуру импульсов САЭ при отношении сигнал-шум до -6 дБ.

4. Восстановление структуры паттернов, состав-

ляющих САЭ, открывает перспективу более глубокого исследования значимости группового поведения импульсов определенных морфологических форм и физических явлений, связанных с пластическими процессами, происходящими в Земной коре.

Литература

1. Федотов, С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном прогнозе / С.А. Федотов // Сейсмическое районирование в СССР. – М.: Наука, 1968. – С. 121–150.
2. Соболев, Г. А. Физика сейсмического землетрясения и прогноз землетрясения / Г.А. Соболев // В сб. Геофизика на рубеже веков. – М.: Изд. ОИФЗ РАН, 2004. – С. 70–79.
3. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. / В.Н. Чебров [и др.] // Вулканология сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.
4. Рикитаке, Т. Предсказание землетрясения / Т. Рикитаке. – М.: Мир, 1979. – 388 с.

5. Марапулец, Ю. В. Мезомасштабная акустическая эмиссия / Ю.В. Марапулец, Б.М. Шевцов. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 126 с.

6. Марапулец, Ю. В. Изменение направленности геоакустического излучения на станции «Микижа» в связи с землетрясениями на Камчатке / Ю.В. Марапулец, А.А. Солодчук, А.О. Щербина // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2016. – № 4 (15). – С. 74–79.

7. Ларионов, И. А. Отклик геоакустической эмиссии на процесс подготовки землетрясений в разных пунктах наблюдений / И.А. Ларионов, А.О. Щербина, М.А. Мищенко // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. – 2005. – № 2 (6). – С. 108–115.

8. Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии / А.А. Афанасьева [и др.] // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 30–34.

9. Соловьев, И. С. Метод выделения короткопериодных флуктуаций в геомагнитном сигнале на основе вейвлет-преобразования / И.С. Соловьев // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2011. – № 7. – С. 35–40.

10. Мандрикова, О. В. Моделирование и анализ параметров ионосферы на основе совмещения вейвлет-преобразования и авторегрессионных моделей / О.В. Мандрикова, Н.В. Глушкова, И.В. Живетьев // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 5. – С. 638–645.

11. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang [et al.] // Proc. R. SOC. London, Ser. A. – 1998. – No. 454. – P. 903–995.

12. Давыдов, В. А. Очистка сигналов от шумов методом эмпирической модовой декомпозиции в диалоговом режиме. [Электронный ресурс] / В.А. Давыдов, А.В. Давыдов // Персональный сайт д-ра геол.-минерал. наук, проф. А. В. Давыдова. – Режим доступа: www.geoin.org/hht/app/hht6.doc, свободный. – Загл. с экрана.

13. Сафиуллин, Т. Н. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Т.Н. Сафиуллин. – Новосибирск, 2015. – 193 с.

14. Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии / А.А. Афанасьева [и др.] // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 30–34.

15. Марапулец, Ю. В. Анализ структуры сигналов акустической эмиссии звукового диапазона методом разреженной аппроксимации / Ю.В. Марапулец, А.Б. Тристанов, Б.М. Шевцов // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 4. – С. 398–406.

Некоторые вопросы концепции национальной безопасности в контексте глобальной цифровизации

Some aspects related to homeland security concept from the perspective of global digitalization

Осадчий / Osadchiy A.

Александр Иванович

(ai_osad@mail.ru)

доктор технических наук, профессор,

член-корреспондент РАЕН.

АО «Морэлектрорадиокомплект»,

генеральный директор.

г. Санкт-Петербург

Попов / Popov S.

Сергей Геннадьевич

(popovserge@spbstu.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнических

университет Петра Великого»,

доцент кафедры «Телематика».

г. Санкт-Петербург

Осадчий / Osadchiy S.

Сергей Александрович

(spb.sos@hotmail.com)

АО «Морэлектрорадиокомплект»,

руководитель проекта.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: национальная безопасность – homeland security; цифровая модель объекта – digital model of a facility; данные – data; программное обеспечение – software; формирование – generation; поиск – surveying; сбор – acquisition.

Бурное развитие Интернет-технологий и формирование большого массива данных (Big Data) в глобальных сетях привело к необходимости обеспечения национальной безопасности государства. В Российской Федерации в условиях санкций и импортозамещения иностранного оборудования и технологий возникает необходимость закрытия доступа к информации о разработке новых информационных и промышленных технологий в России. В статье предлагается подход к построению концептуальной модели национальной безопасности при формировании данных и цифровой модели объекта в контексте глобальной цифровизации.

Rapid development of Internet technologies and generation of data bulk in global networks resulted in the necessity to ensure homeland security. Due to sanctions and import substitution of foreign equipment and technologies in the Russian Federation it becomes necessary to block access to the data related to the development of new information and industrial technologies in Russia. The article offers an approach to building homeland security conceptual model for data generation and digital model of a facility from the perspective of global digitalization.

Современное развитие автоматизированных систем и искусственного интеллекта в рамках работотехники в настоящее время развивается без учета безопасности.

Бурное развитие автоматизированных систем и искусственного интеллекта может привести сначала к замене человека в быту и производстве, а затем и в системах управления. В дальнейшем развитие автоматизированных систем, работотехники и их программно-информационного обеспечения не исключают уничтожения современного уклада жизни человека, что может привести к серьезным последствиям, как в политической, так и экономической деятельности человечества во всем мире.

Эта аксиома должна заставить человечество задуматься об информационной безопасности в рамках развития цифровой экономики.

Создание ситуационных центров, автоматизированных систем электронного документооборота во всех сферах экономики и политики, от управления страной (министерства) до муниципального уровня (предприятия, банка), предполагают не только мониторинг, но и управление на основе больших данных, которые уже в настоящее время подвергаются все больше хакерским атакам.

Все это выставляет требование по информационной безопасности к процессу управления при разработке

и производстве различных систем управления во всех областях и сферах деятельности политики, экономики, промышленности, науки и техники.

Вопросы манипулирования и управления сознанием человека через встроенные ЧИПы и отпечатки пальцев со стороны автоматизированных систем, к чему это может привести! Уже сейчас современная молодежь со смартфоном или планшетом не расстается. Интернет и социальные сети типа «в контакте», «одноклассники» и другие просто «сжирают» время жизни человечества. В «твиттере» написал, эта фраза может касаться любого человека, занимающего пост от Президента и до рабочего. На рабочем месте человек с утра включает ПЭВМ, все рабочие места офисных работников оборудованы ПЭВМ.

В настоящее время существуют вызовы национальной безопасности в контексте глобальной цифровизации. Ведутся работы по разработке и созданию алгоритмов и технологий, которые позволяют извлекать некоторый контекст из всего объема больших данных (Big Data) и на его основе составлять цифровую модель объекта, представленную на рис. 1.

Технология должна «усиливать», «увеличивать», уточнять и расширять представление о цифровой

модели объекта. При этом часть данных о цифровой модели объекта открытые, а часть данных закрытые.

В этой ситуации необходимо оценивать доступность к такой цифровой модели и ее влияние на национальную безопасность.

Если раньше шпионы охотились за документами и «торговали» документами, то в настоящее время охота идет за данными. А в условиях развития телекоммуникационных и социальных сетей национальной безопасности большей представляется угроза возможности хакерского программного обеспечения по доступу к закрытым данным, за счет развития технологий, алгоритмов по обработке открытых данных, а на их основе разработки программного обеспечения, умеющего формировать модели объекта за короткое время, пока информация не устарела и является актуальной исходя из целепологания.

Основу национальной безопасности составляют данные, которые могут быть не только открытыми и закрытыми, но и «крадеными» [3]. Имеющиеся данные создают цифровую модель объекта, которая в свою очередь создает структуру программного обеспечения по формированию цифровой модели объекта (человек, процессор, автомобиль, самолет, вирус и т.д.).

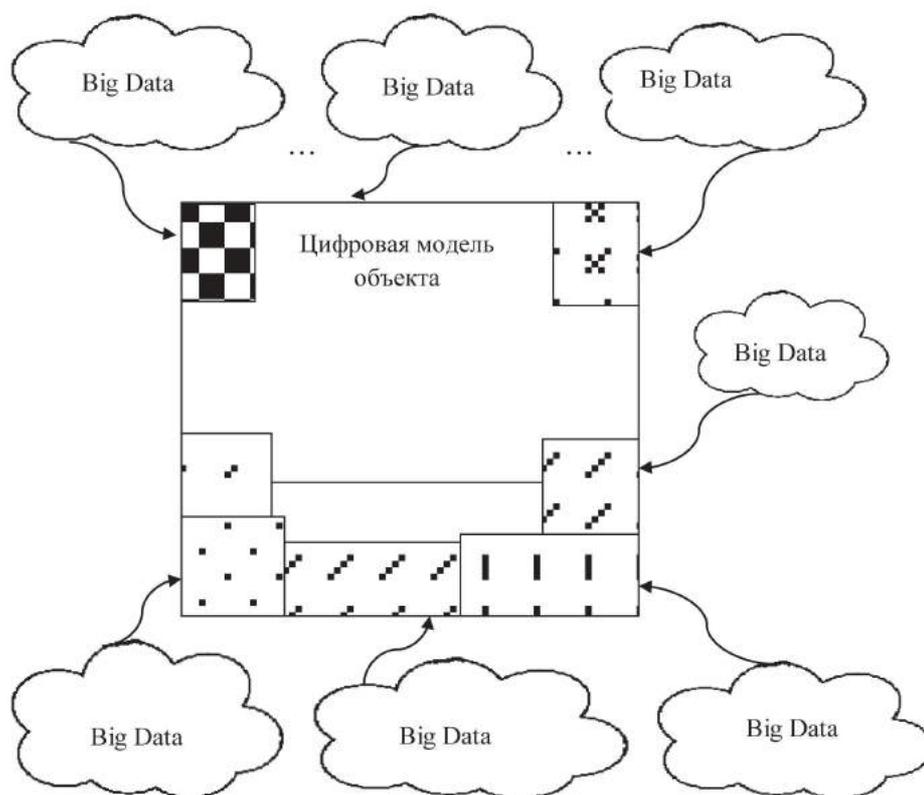


Рис. 1. Формирование цифровой модели объекта из Big Data

Программное обеспечение по формированию цифровой модели объекта должно быть универсальным.

Программное обеспечение должно уметь оценивать объем данных, которые можно собрать о цифровой модели объекта.

Программное обеспечение должно быть совместимо с технологией Big Data и обеспечивать автоматизированную обработку данных среди «хаоса» этих данных с целью формирования модели объекта.

Вызов национальной безопасности состоит в том, что структура программного обеспечения по цифровой модели объекта может сформировать структуру предприятий, занимающихся разработкой и производством, например самолета. При этом, имея цифровую модель объекта, можно оценить важность каждой детали, какое предприятие эту деталь делает, как остановить предприятие, затруднить работу и производство.

В этих условиях стоит задача обеспечения национальной безопасности государства по разработке новой технологии, которая могла бы динамически оценивать и затруднять извлекать некоторый контекст и на его основе составлять цифровую модель объекта.

Если раньше для решения задачи по поиску информации ставилась задача десяткам людей, которые осуществляли сбор информации, то в настоящее время национальной безопасности угрожает скорость сбора и обработки суперкомпьютерных технологий по формированию цифровой модели объекта.

Технология сбора и обработки данных по формированию цифровой модели объекта опирается на математические методы.

Поскольку формирование адекватной и достоверной цифровой модели объекта из множества данных является сложной технологической проблемой, для всего процесса должны применяться системный подход и системная методология [3]. Данный подход и методология при формировании облика и знаний о цифровой модели объекта трактует:

во-первых, в понимании цифровой модели объекта как системы (система – совокупность взаимосвязанных подсистем (элементов), обладающая интегративными и эмерджентными свойствами);

во-вторых, в понимании процесса исследования и поиска данных как системного по своей логике и применяемым средствам.

Во втором аспекте системный подход воплощает в жизнь требования диалектики по объективному, всестороннему и конкретному исследованию цифровой модели объекта, когда сочетаются методы индукции и дедукции, анализа и синтеза, идет постепенное и целенаправленное углубление в сущность рассматриваемой цифровой модели объекта, совершается восхождение от конкретного к абстрактному и далее – к целостному знанию. Первый и второй аспекты системного подхода выражаются в девяти основных принципах.

Процесс сбора и обработки связан с методами анализа и синтеза по определенным критериям, прописанным в программном обеспечении.

Поиск данных о цифровой модели объекта должен начинаться с выделения цифровой модели объекта из суперсистемы и изучение ее структуры. На данном этапе осуществляется определение состава цифровой модели объекта, состава среды и характеристик, а также внутренних и внешних связей. При правильном выделении системы из среды связи между элементами должны быть «сильнее», чем связи со средой.

Процесс выделения подсистем и элементов системы цифровой модели объекта и установление связей между ними принято называть структуризацией. При изучении структуры исследуются связи и класс сложности модели объекта в целом.

Глубина структуризации формирования данных о цифровой модели объекта зависит от значимости влияния элементов и подсистем, степени снятия неопределенности по каждому элементу, подсистеме и их взаимосвязи с другими элементами, подсистемами. При этом анализ возможен через синтез и наоборот синтез через анализ. В целом процесс анализа и синтеза при формировании адекватных и достоверных данных о цифровой модели объекта носит итеративный характер.

При формировании цифровой модели объекта прослеживаются три основных компонента системных исследований:

- структурный;
- функциональный;
- и исторический анализ, которые проводятся в

строгом соответствии с целями поиска данных, выявленным предназначением цифровой модели объекта и с конечной целью формирования знаний о объекте (для разработки, создания и т. п.).

Основное отличие аналитического подхода от системного состоит в том, что при аналитическом подходе движение осуществляется от частей к целому, а при системном – от целого к частям и далее от частей к целому.

Процесс поиска и обработки данных требует рассматривать цифровую модель объекта как единое развивающееся целое, состоящее из взаимосвязанных частей и взаимодействующее с другими объектами, обладающими некоторыми недостающими данными для полного представления и пониманию самой модели объекта [3]. При этом данные о каждом элементе (подсистеме) цифровой модели объекта, как системы подвергается некоторым количественным и качественным изменениям, т.е. находится в развитии. Надо понимать, что цифровая модель объекта – это сложная система и имеет многоуровневую структуру, то есть подсистемы, элементы и данные. Межэлементные связи и данные об элементах являются наиболее важными системообразующими понятиями, благодаря которым формируется целостное знание и представление о цифровой модели объекта, которые позволяют приобрести эмерджентные

свойства. Цифровая модель объекта обладает не только эмерджентными, но и интегративными свойствами, которые не характерны элементам и данным о них.

В контексте глобальной цифровизации в рамках национальной безопасности, формируя открытый набор данных, необходимо оценивать безопасность публикаций с точки зрения глобальности, а не локальности. Например, данные водоканала (размещение коллекторов) и данные электросетей (трассы прокладки силовых кабелей к коллекторам), накладываем здания и видим узловые точки, мы создали цифровую модель объекта. Также можно делать выводы о личности. На сайте МВД есть паспортные данные, а в справке о доходах данные об объектах недвижимости, транспорте, финансовые и составе семьи, отсюда можно формировать выводы о личности, в настоящее время паспортные данные требуют везде, при этом просят расписаться о согласии на обработку персональных данных, а вот обеспечение их безопасности вызывает определенные вопросы, из чего можно сделать выводы об отсутствии реальной работы Закона о защите персональных данных (ФЗ-152).

Теоретически национальная безопасность должна осуществляться через программный продукт «экспертная система» с фильтрацией данных, перед тем как автор «выкладывает» в Big Data или передает данные по глобальным сетям на основе критериев, определенных в «экспертной системе». Формирование критериев должно опираться как на закон Российской Федерации «О Государственной тайне» №5485-1 от 21.07.1993, так и на Конституцию Российской Федерации от 12.12.1993 о доступности к информации.

Вопрос национальной безопасности в нашей стране «качнулся» в сторону открытости и доступности всех и ко всему в 90-е годы, а теперь нас «качнуло» в другую сторону – все закрыть. Истина должна быть посредине, не в области согласия, а в области компромиссов. Необходимо найти оптимум с разделением интересов гражданского общества и национальной безопасности государства, должен быть баланс между этими двумя частями. Возникает вопрос, как его формировать? Большинство правил устарело. В настоящее время со смартфона можно послать что угодно и куда угодно. В связи с этим видится, что правило, определенное в 40-е годы прошлого столетия, что секретноноситель не должен выезжать за границу, наверное устарело. Мы все туже завязываем мешок, а он дырявый. Утечка данных идет через глобальные сети, базы данных и Big Data.

Рассмотренные системные положения – это скорее всего схема формирования облика цифровой модели объекта, (методология) и, конечно, они не решают всех вопросов ее анализа и синтеза данных. Поэтому при создании технологии, алгоритмов, математических моделей, программного и информационного обеспечения необходимо принимать во внимание особенности реальных цифровых моделей объектов, процесса их

функционирования с учетом конкретной среды.

При этом формирование данных и облика цифровой модели объекта в целом должно осуществляться по трем направлениям, с точки зрения:

1) процессов, протекающих как в цифровой модели объекта, так вне цифровой модели объекта (внешняя среда), но влияющих на данные о цифровой модели объекта;

2) цифровая модель объекта, которая состоит из данных о подсистемах (элементах), реализующих информационный процесс с учетом влияния внешней среды и суперсистемы;

3) управления цифровой моделью объекта, как суперсистемой для подсистем и элементов, в автоматическом режиме при автономной работе с учетом внутренних и внешних факторов.

Суть глобальной цифровизации – это появление в электронном пространстве цифровых моделей объектов.

Предмет национальной безопасности в противодействии созданию целостного образа для этой цифровой модели объекта.

Это станет возможно, только когда в Российской Федерации будет обеспечен информационный суверенитет, который должен начинаться с создания отечественной элементной базы, операционной системы [1]. Операционная система должна обеспечивать режим «симплекса» при работе абонента в системе и доступ из внешней среды должен осуществляться по разрешению абонента. При наличии отечественной элементной базы можно будет разрабатывать и производить системы: маршрутизации, коммутации, межсетевые экраны, серверное оборудование, ПЭВМ и другое телекоммуникационное оборудование, с помощью которого будет обеспечиваться национальная безопасность при глобальной цифровизации, в том числе цифровой экономики [2]. Для этого должна быть создана ФЦП и корпорация в каждом Министерстве, с руководителя которого можно будет спросить за результаты. Корпорация должна включать в себя ВУЗы, предприятия, имеющие опыт, желание и научный задел в направлении создания отечественной элементной базы. Дать возможность в этом направлении осуществлять разработку отечественной элементной базы ВУЗам РФ, в том числе отраслевым, а не только предприятиям.

Финансирование ФЦП по разработке отечественной элементной базы должны осуществлять:

- министерство промышленности и торговли;
- министерство образования;
- минкомсвязи.

При этом целесообразным видится не включать в этот список предприятия, которым были выделены средства на разработку отечественной элементной базы и программного обеспечения, но которые не достигли положительных результатов.

Таким образом, в условиях глобальной цифровизации и нарастающей агрессии НАТО, киберагрессии и атак, внедрении в состав систем управления зарубежных

операционных систем, программного обеспечения и телекоммуникационного оборудования, не обеспечивающих несанкционированный доступ и недеklarированные возможности, необходимо:

1. Создание в России ведущего Федерального центра информационных технологий и кибербезопасности (ФЦИТиК) как стратегического партнера развития и внедрения фундаментальных, опережающих информационных технологий и на этой основе создание отечественной высокотехнологичной промышленности телекоммуникационного оборудования и подготовки высококвалифицированных кадров для отрасли.

2. Создание на Северо-Западе России кластера инфотелекоммуникационных технологий и кибербезопасности (ИТКиК) – как основы развития сетей связи двойного назначения.

3. Сохранение отрасли связи и подъем отрасли на новый технологический уровень.

4. Обеспечение безопасности систем управления, органов государственного управления и силовых структур на основе построения сетей связи на высокотехнологичном отечественном оборудовании.

5. Замена импортного оборудования на сетях связи общего пользования с 90 % в настоящее время и доведение наличия импортного оборудования на сетях связи операторов связи до 25 % с 2019 года до 2025 года.

6. Исключение импортного оборудования на сетях связи органов власти и силовых структур.

Основа создания Федерального центра информационных технологий и кибербезопасности в России Указ Президента РФ №899 от 7 июля 2011г. «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ» одно из Приоритетных направлений под №3 – Информационно-телекоммуникационные системы.

Необходимость создания ФЦИТиК опирается на разработанную стратегию для реализации «Основных направлений государственной политики в области развития систем связи для нужд обороны страны, безопасности государства и поддержания правопорядка на период до 2020 года» и состояние дел в отрасли (в области производства отечественного оборудования и подготовки кадров).

Литература

1. Осадчий, А. И. Трансфер телекоммуникационных технологий / А.И. Осадчий, В.И. Комашинский, Т.А. Блатова // Вестник связи. – 2012. – № 8. – С. 16–19.

2. Анализ состояния телекоммуникационных сетей сети связи общего пользования и целесообразности их использования в интересах сетей связи специального назначения / А.И. Осадчий [и др.]. – Научно-технический сборник № 2 (4). – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 270–274.

3. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства / М.А. Коцыняк [и др.]. – СПб: ЛО ЦНИИС, 2014. – 126 с.

Методологии проектирования программных средств в решении задач идентификации данных

Software design methodologies for solving data identification problems

Бойченко / Boychenko O.

Олег Валерьевич

(bolek61@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет

имени В. И. Вернадского»,

профессор кафедры бизнес-информатики

и математического моделирования.

г. Симферополь

Ключевые слова: информационная система управления – management information system; данные – data; методология – methodologies; программные средства – software tools; достоверность – consistency; масштабность – shape proportion; формальные спецификации – formal specification.

В статье исследованы современные направления решения проблем усовершенствования методологий проектирования программных средств, ориентированных на данные, что позволяет решать вопросы количественного определения масштабности и полноты данных информационной системы для установлении их достоверности, как основного критерия, отличающего уровень защищенности информации. Предложено использование методов формальных спецификаций в усовершенствовании научно-методического аппарата количественного определения достоверности данных автоматизированной управляющей информационной системы через показатели масштабности и полноты содержания информационных ресурсов.

The article investigates current trends for solving the problems related to upgrade of data-oriented software design tools providing for the possibility to evaluate quantifiable effect of information system data shape proportion and integrity in order to determine its consistency as the main criterion distinguishing the level of information security. It has been proposed to use methods of formal specification for improvement of scientific-methodological approach to quantifiable effect of automated controlling information system data consistency based on shape proportion and content integrity indicators of data resources.

В методологиях, ориентированных на данные, выделяются компоненты проекта, основанные на данных (объектно-ориентированная методология проектирования и методология проектирования концептуальных баз данных). Актуальность использования такого подхода не вызывает сомнений, поскольку обе

технологии принадлежат к методу формализации спецификаций, концепция которого отличается прогрессивностью в решении задач определения достоверности данных информационной системы управления.

Цель работы состоит в усовершенствовании научно-методического аппарата определения масштабности и полноты данных подсистемы автоматизации принятия решений в информационных системах поддержки решений (ИСПР) для решения задач идентификации данных и их атрибутов.

Прежде всего следует подчеркнуть, что программы могут быть построены методически (систематично), исходя из формальных спецификаций на данные, с которыми они работают. Базируясь на формальных спецификациях, возможно разработать средства автоматического программирования и доказательства целесообразности программ. Особое внимание в литературе уделяется абстракциям данных на известных математических основах корректности с использованием алгебраических и аксиоматических спецификаций. Во многих работах формальные спецификации с учетом техники верификации используются для выявления ошибок на ранних стадиях жизненного цикла программных средств.

При этом объектно-ориентированная методология основана на концепциях скрытия информации и абстрактных типов данных. Такой подход рассматривает весь спектр ресурсов, таких как данные, модули и системы в качестве объектов.

Посредством возможности создавать в процессе проектирования различные виды абстракции типов данных, на этом пути проектировщик может концентрироваться на проекте системы, не вдаваясь в детали информационных объектов, используемых в системе. При этом нет принципиального различия в использовании языка программирования для полного разделения спецификаций и их реализацией в данной методологии.

Отметим порядок основных действий, реализованных по предложенной методологии:

- определение проблемы;
- развитие неформальной стратегии, которая представляет общую последовательность действий, удовлетворяющих требованиям к системе;
- формализация стратегии (идентификация объектов и их атрибутов; идентификация операций над объектами; установление интерфейсов; реализация операций).

Методология, основанная на проектировании концептуальных баз данных, принадлежит к классу методологий, ориентированных на данные, и используется для формирования методических указаний проектировщику в процессе трансляции спецификаций в концептуальную схему базы данных. Этот подход ставит своей целью установление унифицированной концептуальной модели с более насыщенным семантическим значением и использование концепции абстракций данных для упрощения процедуры проектирования. На самом деле, это разновидность представления знаний, которая захватывает проблемы реального времени и код, используемый ЭВМ.

Процесс проектирования рассматривается как процесс построения модели. При этом наиболее известными методами конструирования концептуальной модели являются методы, основанные на способах обобщения (специализации). Также предусматривается, что проектировщик начинает с определения наиболее общих естественно возникающих классов объектов и событий предметной области. А последующие детали программной системы вводятся последовательными итерациями описанием подклассов уже представленных классов и специализаций взаимодействия в этих классах. Следует отметить, что эта отрасль взаимосвязи между способами концептуального моделирования, представления знаний и механизмов абстрагирования, безусловно, требует проведения дальнейших исследований.

Однако в нашем случае для решения частных задач, будем ориентироваться на использование методов модульного кодирования уровней проектирования (структурное программирование) [1, 2] (рис. 1).

Практика показывает, что структурное программирование само по себе не очень эффективно при проектировании больших систем. Для достижения максимальной надежности и снижения стоимости необходимо объединять средства структурного программирования с методологией проектирования программных средств (ПС), работой непосредственных программистов, а также библиотек, поддерживающих процесс развития проекта.

Процесс проектирования ПС – это процесс решения проблем человеком, который аналогичен другим процессам решения проблем в науке и технике. Однако вследствие ограниченности возможностей человеческого мозга, который не в состоянии охватить все мелкие детали, необходимо четко опреде-

лять конкретный способ представления проекта. Это определение в дальнейшем и будет использоваться в качестве средства общения, причем результирующий код должен выводиться из этого определения просто и однозначно, а приемы такого определения могут быть классифицированы как графические и языковые (вербальные).

Метод основан на допущении того, что код легче читается, чем пишется и сопровождается, в том случае, если он сконструирован из фиксированного набора базовых структур, в которые не включают оператор GOTO.

В частности, доказано [3], что любая сложная система может быть представлена с использованием трех базовых структур, таких как последовательность, итерация, выбор. В свою очередь, структурное программирование охватывает четыре тесно связанные проблемы, такие как методология проектирования, аннотирование, корректность и верификация.

Методы графического представления проекта целесообразно представить в следующей классификации:

1. Блок-схема (схема) – наиболее распространенная и наиболее понятная форма графического представления (рис. 1, левая колонка). В соответствии с представлением по фон Нейману (как средство документации программ), для каждой программной структуры существует соответствующая графическая схема, что определяет основные преимущества метода (простота и наглядность). Однако необходимо обратить внимание на недостатки, такие как несовместимость аннотаций с используемыми в спецификациях и реализациях (их недостаточность в проектировании крупномасштабных систем ПС), невозможность прямого введения в ЭВМ и выведения их нее (практическое отсутствие средств автоматизированной поддержки), а также отсутствие эффективного средства управления уровнем детализации в рамках каждой схемы.

2. Диаграммы Несси-Шнейдермана (рис. 1, средняя колонка) призваны поддерживать структурное программирование на основе предложенных специальных графических прямоугольных изображений для базовых структур (программа описывается с использованием этих изображений). Основные характеристики представлены тем, что в данных методах четко определена функциональная часть, запрещены произвольная передача управления, легко определяются границы локальных и глобальных данных, а также легко рекомендуются рекурсивные свойства.

Здесь наиболее популярным является использование иерархических графов (расширение обычных ориентированных графов), которые используются для моделирования программ и структур данных. Это позволяет проектировщику представлять крупномасштабные системы ПС, используя в этом представлении поток управления, поток данных и модульную иерархию [4].

При этом расширенные графы позволяют отобразить множество различных отношений [5], которые зада-

ются на модульной иерархической структуре. Известно также их использование в качестве моделей процесса проектирования, с целью верификации модульных иерархических структур, а также с целью задания структур данных.

3. R-технология [6] представляет собой вербально-графическую разновидность структурного программирования и практически отличается от представленных ранее только лишь использованными аннотациями, приспособленными к экранной форме представления алгоритма.

Среди методов языкового (вербального) представления существует два типа языков программирования: процедурные (описывают процедуру решения задачи на ЭВМ, задают вид алгоритма нахождения ее решения

– FORTRAN, PL, PASCAL.) и непроедурные, описывающие не конкретный алгоритм решения задачи, а ее точную постановку и необходимые условия решения.

В наиболее мощных языках подобного типа, пользователь должен лишь точно сформулировать с некоторой фиксированной проблемной отрасли, ЭВМ, с помощью вложенных в нее средств (важнейшим из них является планировщик, работающий на семантической сети и отражающий все связи между понятиями, которые входят в описание задачи, а также типовыми вычислительными и логическими модулями, хранящимися в памяти ЭВМ), самостоятельно строит алгоритм решения и превращает сама его в программу.

Наиболее популярным непроедурным языком «низкого уровня» является язык таблиц решения (Табл. 1).

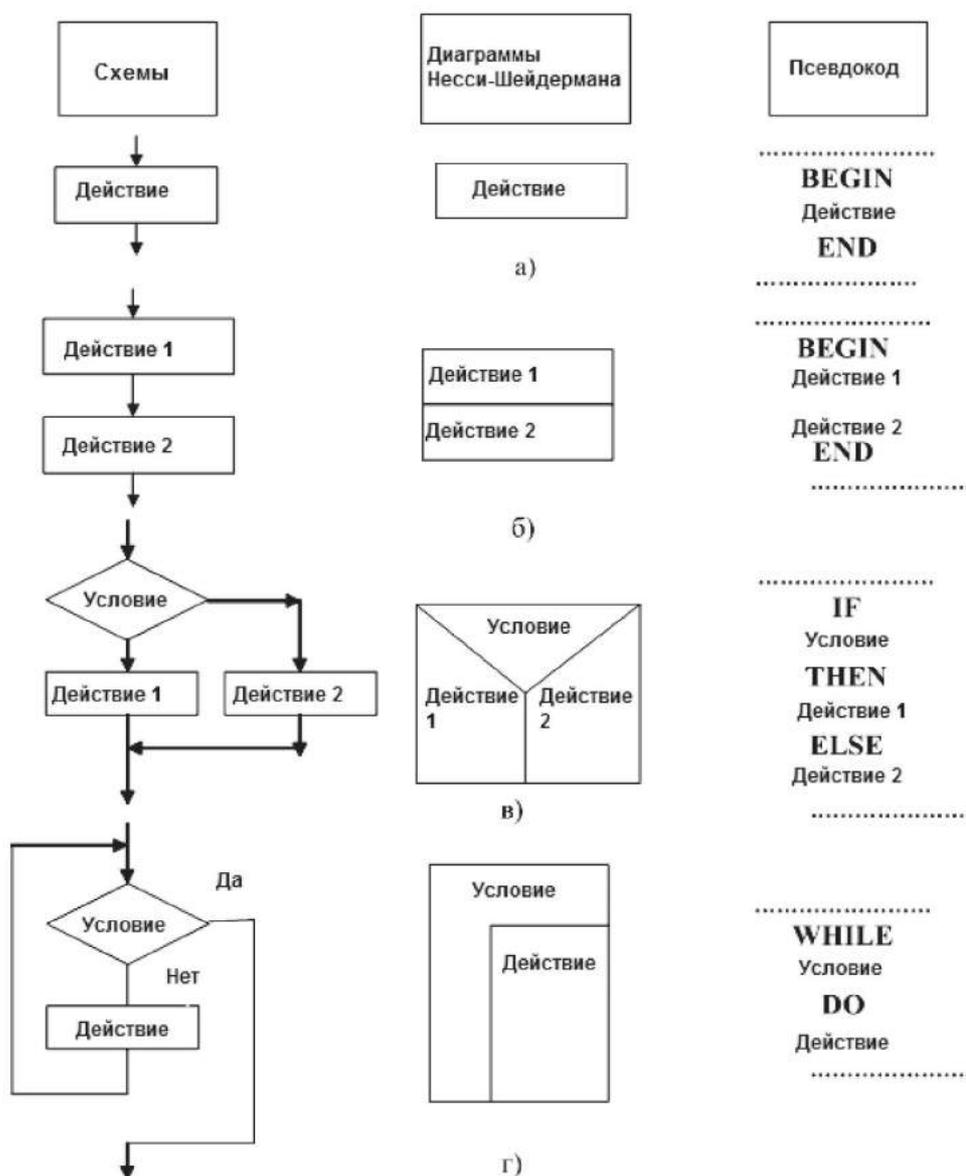


Рис. 1. Базовые операторы структурного программирования: а) действия; б) последовательность; в) выбор; г) итерация

Таблица 1

Общая структура таблицы решения

Условие/ действие	Правило 1	Правило 2	..	Правило m
Условие 1	b_{11}	b_{12}	..	b_{1m}
Условие n	b_{n1}	b_{n2}	..	b_{nm}
Действие 1	+			
Действие 2	+	+		+
Действие k				+

Таким образом, язык проектирования программы (PDL) (рис. 1, правая колонка) является средством проектирования, основанным на использовании утверждений естественного языка в сочетании с набором фиксированных конструкций. Ее использование базируется на том факте, что приближение средств фиксации проекта к человеку уменьшает число ошибок, допущенных им при проектировании. Кроме того, принципы проектирования с использованием PDL включают процедуры итеративной детализации, философию структурного программирования и инструментальные средства.

Исследование существующих подходов к проектированию программ, а также анализ зависимостей продуктивности работы программистов от разнообразных факторов, позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальная продуктивность достигается в том случае, когда программист создает программу по алгоритму, созданному им самим. Поэтому методология должна предусматривать участие программиста в процессе проектирования с самого начала, а именно с постановки задачи, а не с этапа кодирования.

2. Программист в равных условиях пишет в среднем определенное количество операторов исходного кода, независимо от выбранного языка. Поэтому конечная продуктивность (в количестве машинных команд) тем выше, чем выше уровень языка программирования. Язык должен позволять начало кодирования на наиболее ранних фазах разработки, поэтому необходим единый подход к разработке ПС, предусматривающих реализацию условий использования на протяжении всего жизненного цикла единой интегрированной методологии, обеспечение управления сложностью, ограничение влияния ошибок и стандартизацию.

При этом основным средством борьбы со структурной сложностью проектированного ПС является декомпозиция (декомпозиция операций и декомпозиция данных), позволяющая свести описание системы или описание ее части (пошаговое описание) с поступательной детализацией и использованием двух направлений разработки (вниз и вверх), сочетаемыми между собой.

3. Инструментальные средства должны быть ориентированы на проектирование слоями и представлять собой некоторую иерархию. Также вследствие того, что продуктивность труда проектировщика падает нелинейно с ростом размеров программ, чем меньше размер модулей, тем эффективнее процесс проектирования, а обеспечение надежности, гибкости, модификации ПС достигается на фазах проектирования за счет глубокой структурированности ПС.

4. Методология должна иметь следующие признаки:

- наглядность и однозначность предоставления проекта, что обеспечивается использованием графических средств, которые повышают однозначность представления в сравнении с лексическими средствами;
- содержательность подачи (точность, полнота и грамматическая простота используемой семантики);
- возможность обеспечения итерации приемлемых решений и альтернативных вариантов, что обусловлено динамическим характером процесса разработки;
- возможность детализации разрабатываемого проекта по уровням подачи;
- возможность реализации оптимизационных решений, обусловленных конкретными условиями и ограничениями;
- статичность – метод должен обеспечить возможность описания самой проблемы, а не метода ее решения;
- абстрактность – описание должно быть выполнено на достаточно концептуальном уровне;
- универсальность – метод должен подходить к широкому кругу задач.

5. Приведенная методология является основой технологии автоматизированного производства, под которой понимают совокупность методологических, программных и технических средств, регламентирующих эффективное использование ЭВМ с целью сокращения трудозатрат и повышения качества проектирования разработки (программирования), наладки, выпуске документации и внедрения ПС на основе общности информационной и научно-организационной баз.

Основой технологии автоматизированного производства является:

- комплексное рассмотрение всех этапов создания программного продукта, системность и оперативность внесения изменений на основе наличия соответствующей методологии, удовлетворения всех информационных потребностей разработчиков программ, наличия средств управления развитием системы и возможности эффективного манипулирования с программой и данными;

- средства обоснования проекта программной системы и контроля ее качества (что допускает наличие возможностей понятного и однозначного формулирования требований к системе), фиксации вариантов проекта, разработку методов количественного оценивания каждого варианта;

- инструментальные и речевые средства, которые обеспечивают структурированность, сжатость, удобство чтения, информативность, слаженность, коммуникативность, рациональность, дополняемость, доступность, а также корректность и устойчивость;

- методология и инструментарий технологии автоматизированного производства должны обеспечивать эффективность разрабатываемых программ, возможность программно управлять работой аппаратных средств вычислительного комплекса, наличие средств описания внешней и внутренней синхронизации (синхронизации вычислительного процесса с технологическим и задач ПС между собой).

Подводя итог, следует отметить, что использование методов формальных спецификаций в усовершенствовании научно-методического аппарата количественного определения масштабности и полноты данных подсистемы автоматизации принятия решений в ИСПР позволяет создать условия для решения задач идентификации данных и их атрибутов, что в конечном результате повышает эффективность функционирования ИСПР в целом.

Литература

1. Дал, У. Структурное программирование: монография / У. Дал, Э. Дийкстра, К. Хоор. – М.: Мир, 1975. – 250 с.
2. Dijkstra, E. W. Goto Statement considered harmful / E.W. Dijkstra // SACM 1. – 1968. – No. 3. – P. 147–148.
3. Глушков, В. М. Алгебра, языки, программирование: монография / В.М. Глушков, Г.Е. Цейтлин, Е.Л. Ющенко. – К.: Наукова думка, 1978. – 320 с.
4. Сбитнев, А. И. Моделирование структурных свойств программного обеспечения АСУ при человеко-машинном проектировании / А.И. Сбитнев // Кибернетика и вычислительная техника. – 1981. – С. 31–34.
5. Сбитнев, А. И. Построение верификатора модульной системы на основе расширенных графов / А.И. Сбитнев // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – С. 96–98.
6. Вельбицкий, И. В. Технология программирования: монография / И.В. Вельбицкий. – К.: Техника, 1984. – 279 с.

Программное обеспечение автоматизированного рабочего места метролога-эксперта

Metrologist`s automated workstation software

Гусеница / Gusenitsa Ya.

Ярослав Николаевич

(yaromir226@mail.ru)

кандидат технических наук.

Военный инновационный технополис «ЭРА»,

начальник лаборатории испытательной

(информатики и вычислительной техники).

Краснодарский край, г. Анапа

Микляев / Miklyaev D.

Дмитрий Сергеевич

(jokemds@gmail.com)

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ, курсант.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: метрологическая экспертиза – metrological examination; субъективность оценок – subjectivity of ratings; уровень компетенции – expertise level; достоверность результатов – validity of test results; автоматизированное рабочее место – automated workstation; программное обеспечение – software.

В работе подложена программная реализация методики обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники на основе разработки программного обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта. Описан состав, назначение и особенности программных модулей и математического обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта, реализующих приведенные выше функции. Представлен пример окон графического пользовательского интерфейса программного обеспечения автоматизированного рабочего места метролога-эксперта.

The article is focused on software implementation of the methodology ensuring the validity of rocket and space equipment samples metrological examination based on metrologist`s automated workstation software design. It describes the scope, purpose and special characteristics of software modules and mathematical tool for metrologist`s automated workstation implementing the above mentioned functions. The example of graphical user interface windows for metrologist`s automated workstation software has been presented.

Современный этап развития геополитической обстановки в мире характеризуется острым соперничеством 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 приме-

нению ракетно-космической техники (РКТ). Достижение высоких значений перечисленных характеристик возможно только при условии реализации всего комплекса мероприятий метрологического обеспечения образцов РКТ на всех этапах их жизненного цикла, начиная с исследований и обоснования разработки и заканчивая снятием с эксплуатации и списанием [3]. При этом определяющее значение на начальных стадиях жизненного цикла образцов РКТ отводится метрологической экспертизе (МЭ), под которой понимается анализ и оценка правильности принятых решений по метрологическому обеспечению, направленных на достижение единства, требуемой точности измерений и достоверности контроля параметров технического состояния и тактико-технических характеристик образцов РКТ [4, 6].

Вместе с тем анализ существующего научно-методического обеспечения проведения МЭ показывает, что оно не учитывает новые условия контроля «метрологического совершенства» образцов РКТ [2]. В частности, существующие методики не учитывают субъективность результатов метрологической экспертизы, а также уровень компетентности метрологов-экспертов, которые оказывают существенное значение на результаты МЭ. Кроме того, в настоящее время фактически отсутствуют методики, реализующие системный подход в обеспечении достоверности результатов МЭ при формировании состава экспертной группы, получении индивидуальных и групповых оценок результатов определения несоответствий, расчете и оценивании показателей достоверности результатов МЭ.

В работе [2] предложена методика обеспечения достоверности результатов МЭ образцов РКТ, позволяющая учесть субъективность индивидуальных оценок метрологов-экспертов, уровень их компетентности при

формировании групповых оценок, а также реализовать комплексное оценивание показателей достоверности результатов МЭ. Кроме того, определена ее дальнейшая реализация в виде автоматизированного рабочего места (АРМ) метролога-эксперта, которое по мере участия каждого привлекаемого эксперта позволит корректировать и вырабатывать обоснованное решение о выявленных недостатках при проведении МЭ образцов РКТ.

Под АРМ метролога-эксперта в дальнейшем будем понимать программно-технический комплекс, предназначенный для автоматизации МЭ образцов РКТ.

Для разработки прикладного программного обеспечения (ПО) АРМ метролога-эксперта выбрана программа Microsoft Access 2010. Это связано с тем, что данная программа активно применяется в различных коммерческих и государственных организациях в России и за рубежом [8–11]. Она разрешена и используется в Министерстве обороны Российской Федерации, в том числе при решении различных задач, связанных с метрологическим обеспечением войск (сил) [1]. Кроме того, Microsoft Access 2010 позволяет создавать программные модули, которые представляют собой совокупность инструкций на объектно-ориентированном языке Visual Basic for Application, предназначенные для решения сложных задач по обработке данных в базе данных [12, 15, 16].

Разработанное прикладное ПО АРМ метролога-эксперта позволяет реализовать следующие возможности [5]:

- определение уровня компетентности метрологов-экспертов на основе данных об уровне образования, занимаемой должности, опыту работы, а также количестве проведенных МЭ;

- обработка индивидуальных оценок недостатков, выявленных по результатам МЭ, с учетом уровня компетентности метрологов-экспертов;

- расчет групповых оценок недостатков, выявленных по результатам МЭ, расчет показателей достоверности результатов МЭ;

- определение достоверных результатов МЭ.

Для выполнения перечисленных функций разработан графический пользовательский интерфейс (рис. 1), а также следующие программные модули:

- «Module_расчет_компетентности»;
- «Module_индивидуальная_оценка»;
- «Module_групповая_оценка»;
- «Module_расчет_достоверности»;
- «Module_выбор_достоверных_оценок»;
- «Module_методика».

«Module_расчет_компетентности» реализует алгоритм, предназначенный для определения коэффициента компетентности каждого метролога-эксперта. Данный алгоритм включает нижеперечисленные шаги (рис. 2).

Шаг 1. Проверить расположение указателя таблицы «tb_Эксперты». Если указатель находится не на первой строке в «tb_Эксперты», то алгоритм завершается.

Шаг 2. Перенести указатель в таблице «tb_Эксперты» на первую строку и присвоить $j = 1$.

Шаг 3. Проверить расположение указателя таблицы «tb_Эксперты». Если указатель находится на последней строке таблицы «tb_Эксперты», то алгоритм завершается.

Шаг 4. Извлечь из таблицы «tb_Эксперты» вербальные значения критериев компетентности.

Шаг 5. Найти в таблицах с критериями числовые значения критериев компетентности.

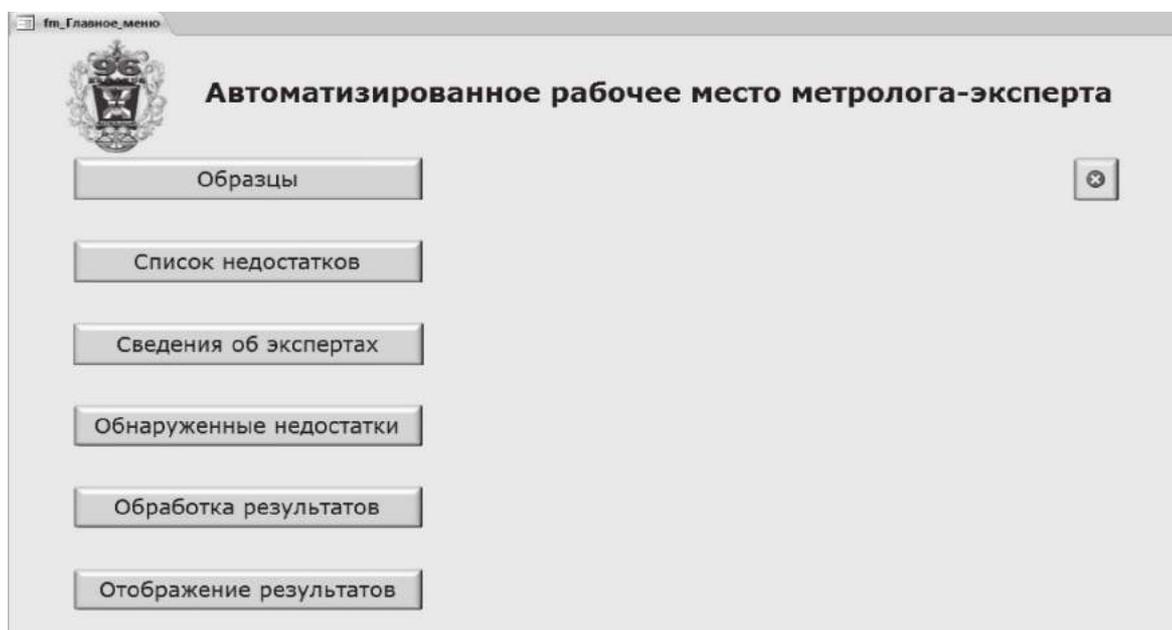


Рис. 1. Окно графического пользовательского интерфейса

Шаг 6. Рассчитать значение коэффициента компетентности метролога-эксперта по формуле:

$$q_j = \frac{\sum_{l=1}^L B_{jl}}{\sum_{l=1}^L B_{l\max}}$$

где v_{il} – вес j -го эксперта по l -му критерию; $v_{l\max}$ – предельный вес l -го критерия; L – общее количество критериев.

Шаг 7. Записать значение коэффициента компетентности в таблицу «tb_Эксперты».

Шаг 8. Перенести указатель таблицы «tb_Эксперты» на следующую строку $j = j + 1$ и перейти к шагу 3.

«Module_индивидуальная_оценка» позволяет получить индивидуальную оценку результатов определения недостатков метрологами-экспертами на основе преобразования матрицы P субъективных вероятностей в матрицу W индивидуальных оценок, учитывающих уровень компетентности экспертов:



Рис. 2. Схема алгоритма определения коэффициента компетентности каждого метролога-эксперта

$$AP = W,$$

где A – оператор преобразования матрицы;

$$P = (p_{ij})_{i=1..I, j=1..J} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1J} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{I1} & p_{I2} & \dots & p_{IJ} \end{pmatrix}$$

– матрица субъективных вероятностей, состоящая из элементов p_{ij} и имеющая размерность $I \times J$ (I – количество недостатков, J – количество метрологов-экспертов);

$$W = (w_{ij})_{i=1..I, j=1..J} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1J} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{I1} & w_{I2} & \dots & w_{IJ} \end{pmatrix}$$

– матрица субъективных вероятностей, состоящая из элементов w_{ij} и имеющая размерность $I \times J$.

Матрица P субъективных вероятностей хранится в базе данных и является результатом определения недостатков образца РКТ. Данный процесс осуществляется на основе индивидуального ознакомления каждого j -го эксперта с образцом РКТ. Каждый j -й эксперт для каждого обнаруженного им i -го недостатка фиксирует его и выставляет индивидуальную оценку $p_{ij} \in [0,1]$, которая является субъективной вероятностью нахождения i -го недостатка в указанном месте и отражает степень уверенности в этом j -го эксперта. Для формирования матрицы субъективных вероятностей в разработанном ПО имеется специальное окно графического пользовательского интерфейса (рис. 3).

Для преобразования матрицы субъективных вероятностей в матрицу индивидуальных оценок, учиты-

вающих уровень компетентности экспертов, элементы p_{ij} матрицы субъективных вероятностей и коэффициенты компетентности q_j подставляются в следующее выражение:

$$w_{ij} = p_{ij} \cdot q_j.$$

«Module_групповая_оценка» позволяет получить групповые оценки результатов определения недостатков образца РКТ на основе преобразования матрицы W в матрицу-столбец \bar{W} групповых оценок:

$$\bar{W} = (\bar{w}_i)_{i=1..I} = \begin{pmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \dots \\ \bar{w}_I \end{pmatrix}.$$

Для этого элементы матрицы подставляются в следующее выражение:

$$\bar{w}_i = \frac{\sum_{j=1}^J w_{ij}}{J}.$$

Полученные групповые оценки характеризуют групповое мнение экспертов о недостатках.

«Module_расчет_достоверности» позволяет получить показатели достоверности результатов МЭ образца РКТ, а именно:

- дисперсии экспертных оценок;
- среднеквадратические отклонения экспертных оценок;
- коэффициенты вариации экспертных оценок;
- коэффициент конкордации Кендалла.

Дисперсии D_i экспертных оценок являются абсолютными характеристиками разбросанности значений

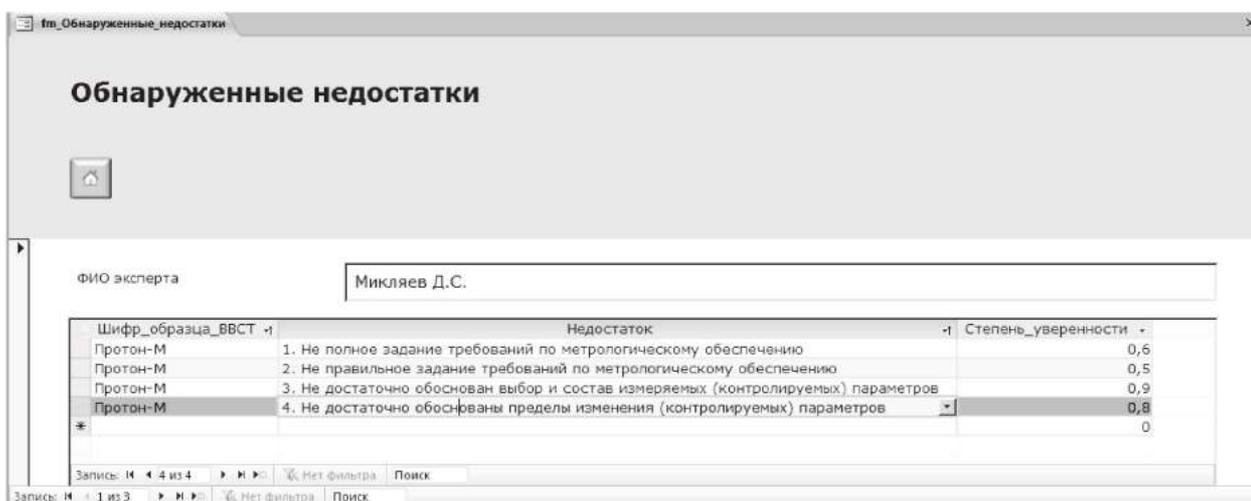


Рис. 3. Окно графического пользовательского интерфейса для формирования матрицы субъективных вероятностей

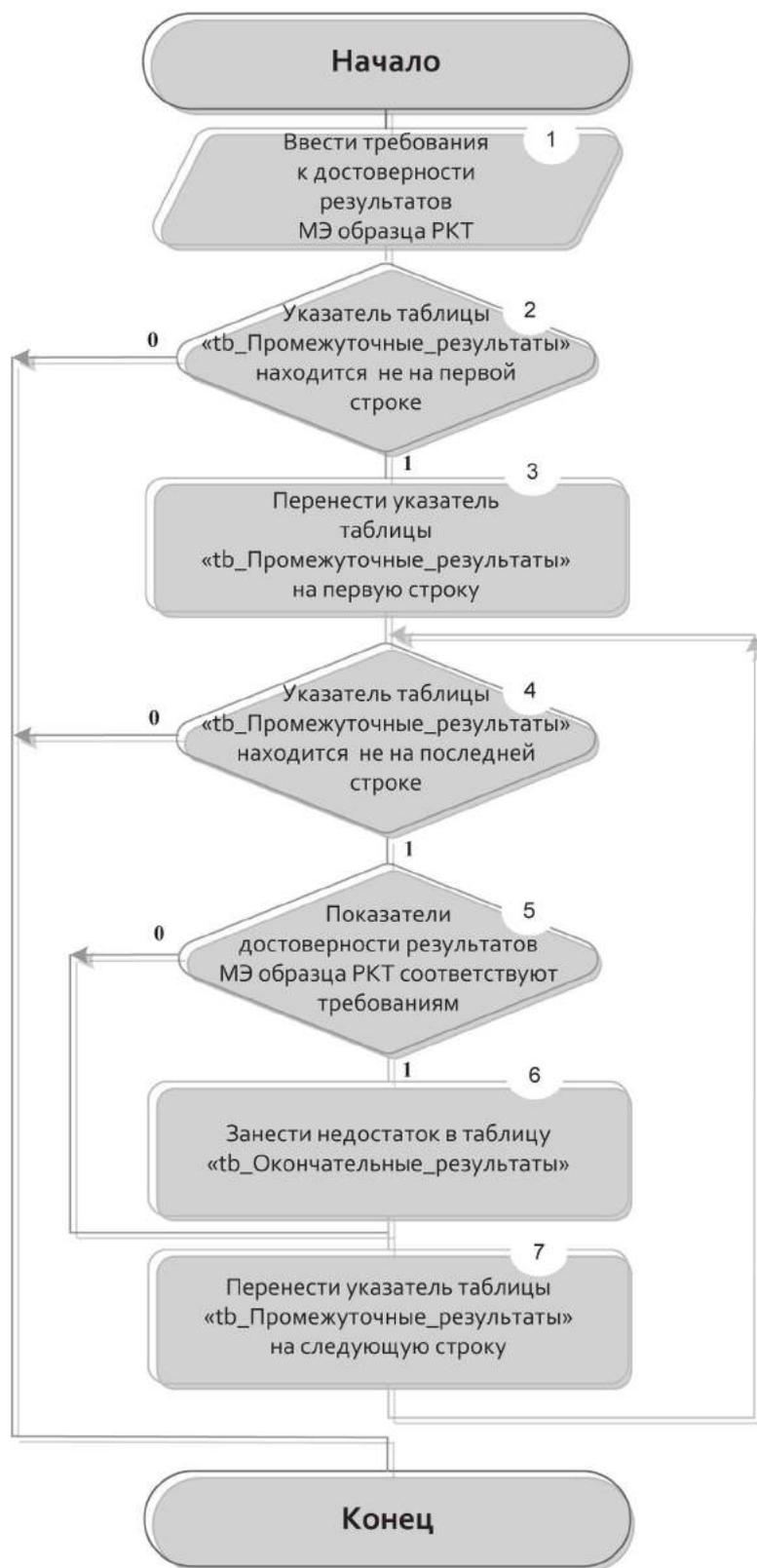


Рис. 4. Схема алгоритма оценивания и выбора достоверных результатов МЭ образца РКТ

индивидуальных оценок относительно групповых и рассчитываются по следующей формуле:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^J (w_{ij} - \bar{w}_i)^2}{J - 1}.$$

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 σ_i экспертных оценок. Значения данного показателя рассчитываются по следующей формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{D_i}.$$

Коэффициенты вариации v_i экспертных оценок являются относительными характеристиками разбросанности значений индивидуальных оценок относительно групповых. Значения данного показателя рассчитываются по следующей формуле:

$$v_i = \frac{\sigma_i}{\bar{w}_i}.$$

Коэффициент S конкордации Кендалла характеризует степень согласованности метрологов-экспертов между собой, т.к. позволяет количественно определить область группового мнения. Значение данного показателя рассчитывается по следующей формуле:

$$S = \frac{12 \sum_{i=1}^I D_i}{J^2 (I^3 - 1)}.$$

Коэффициент S принимает значение в пределах от 0 до 1. $S = 1$ означает полную согласованность мнений метрологов-экспертов, при $S = 0$ – полную несогласованность. Низкое значение этого коэффициента свидетельствует об отсутствии общности мнений метрологов-экспертов и требует повторного проведения МЭ образца РКТ.

«Module_выбор_достоверных_оценок» реализует алгоритм, предназначенный для оценивания и выбора достоверных результатов МЭ образца РКТ. Данный алгоритм включает нижеперечисленные шаги (рис. 4).

Шаг 1. Ввести требования к достоверности результатов МЭ образца РКТ в специальном окне графического пользовательского интерфейса (рис. 5).

Шаг 2. Проверить расположение указателя таблицы «tb_Промежуточные_результаты». Если указатель находится не на первой строке в «tb_Промежуточные_результаты», то алгоритм завершается.

Шаг 3. Перенести указатель в таблице «tb_Промежуточные_результаты» на первую строку.

Шаг 4. Проверить расположение указателя таблицы «tb_Промежуточные_результаты». Если указатель находится на последней строке в «tb_Промежуточные_результаты», то алгоритм завершается.

Шаг 5. Проверить соответствие полученных показателей достоверности результатов МЭ образца РКТ требованиям. Для этого используется следующий критерий класса пригодности [3]:

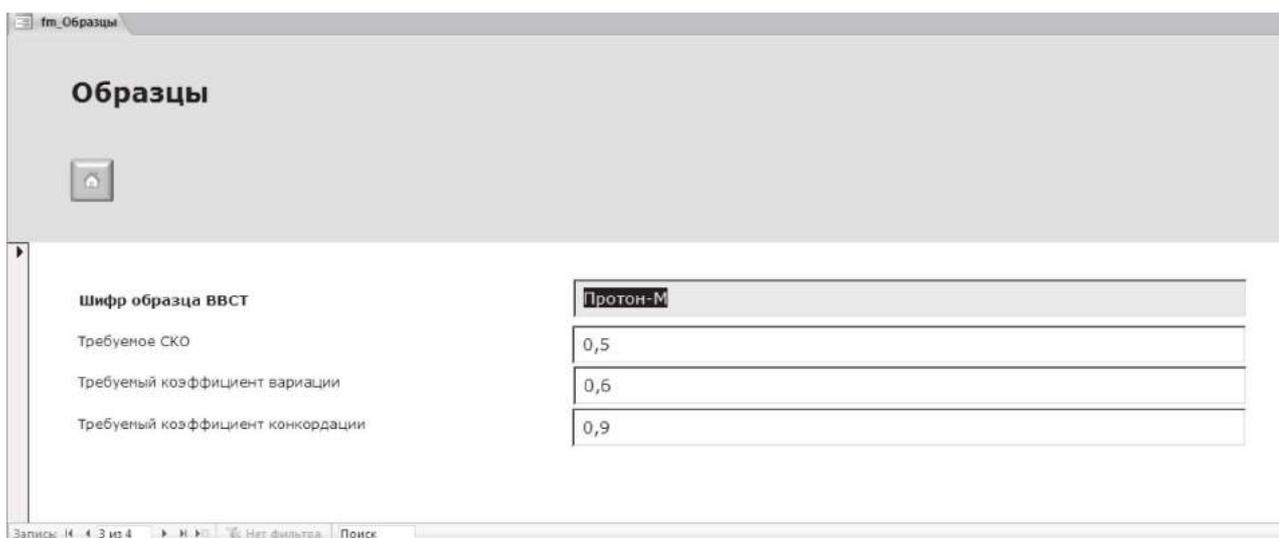


Рис. 5. Окно графического пользовательского интерфейса для формирования требований к результатам МЭ образца РКТ

$$i = \overline{1, I}; (D^{\Delta} \geq D_i) \wedge (\sigma^{\Delta} \geq \sigma_i) \wedge (v^{\Delta} \geq v_i) \wedge (S^{\Delta} \leq S_i), \quad (1)$$

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.

Если условие (1) не выполняется, то перейти на шаг 7.

Шаг 5. Занести недостаток в таблицу «tb_Окончательные_результаты».

Шаг 6. Перенести указатель таблицы «tb_Промежуточные_результаты» на следующую строку и перейти на шаг 4.

Все описанные выше программные модули основаны на использовании технологии ADO (от англ. Active Data Object), которая позволяет получить доступ к таблицам базы данных АРМ метролога-эксперта. Более подробно данная технология представлена в работах [7, 13, 14]. Исключением является «Module_методика», который последовательно вызывает программные модули, реализуя методику обеспечения достоверности результатов МЭ образцов РКТ [2].

Таким образом, разработанное программное обеспечение может быть использовано в научных подразделениях при проведении военно-метрологического сопровождения жизненного цикла и метрологической экспертизы вооружения, военной и специальной техники.

Литература

1. Гусеница, Я. Н. Информационные технологии в области метрологического обеспечения войск (сил). Часть 3. Информационное обеспечение автоматизированных систем / Я.Н. Гусеница. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. – 70 с.
2. Гусеница, Я. Н. Методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники / Я.Н. Гусеница, А.Н. Новиков // Информатика и Космос. – 2017. – № 2. – С. 154–159.
3. Метрология, стандартизация и сертификация / под ред. А.Н. Дорохова. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. – 153 с.
4. Лесун, И. В. Основные направления развития метрологического обеспечения вооружения и военной техники / И.В. Лесун // Оборонный комплекс Российской Федерации: состояние и перспективы развития. – 2011. – Т. 7. – С. 447–454.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660123. Программное обеспечение автоматизированного рабочего места метролога-эксперта / Я.Н. Гусеница [и др.]; дата поступления 18.07.2017, дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 14.09.2017.
6. Швыдун, В. В. Актуальные вопросы организации работ по метрологической экспертизе вооружения и военной техники / В.В. Швыдун // Военная мысль. – 2008. – № 2. – С. 55–58.
7. Boehm, A. Murach's ADO.NET 4 Database Programming with Visual Basic 2010 / A. Boehm, G. Mead. – 4th ed. – Fresno: 2011. Mike Murach & Associates. – 876 p.

8. Grauer, R. T. Microsoft Office Access 2010 / R.T. Grauer, K. Mast, M.A. Poatsy. – New Jersey: Prentice Hall, 2010. – 740 p.
9. Griffith, G. L. Access® 2010 24-Hour Trainer / G.L. Griffith, T.L. Bradly. – New York: Wiley Publishing, 2011. – 552 p.
10. Groh, M. R. Access 2010 Bible / M.R. Groh. – New York: Wiley Publishing. 2010. – 1343 p.
11. Jennings, R. Teach Yourself Visually Access 2010 / R. Jennings. – New York: Pearson Education, 2010. – 352 p.
12. Mansfield, R. Mastering VBA for Microsoft Office 2016 / R. Mansfield. – 3rd ed. – New York: Wiley Publishing, 2016. – 984 p.
13. Mueller, J. P. Microsoft ADO.NET Entity Framework. Step by Step / J.P. Mueller. – Sebastopol: Microsoft Press, 2013. – 441 p.
14. Patrick, T. Microsoft ADO.NET 4. Step by Step / T. Patrick. – Sebastopol: Microsoft Press. 2010. – 411 p.
15. Shepherd, R. Microsoft Access 2010 VBA. Macro Programming / R. Shepherd. – New York: McGraw-Hill, 2010. – 373 p.
16. Zak, D. L. Visual Basic for Applications / D.L. Zak. – Boston: Course Technology, 2011. – 1008 p.

Детектирование сетевых распределенных атак на основе алгоритмов машинного обучения

Detection of network distributed attacks based on machine learning algorithms

Пиховкин / Pikhovkin N.

Николай Леонидович
(n.pikhovkin@gmail.com)
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО), аспирант.
г. Санкт-Петербург

Попов / Popov I.

Илья Юрьевич
(ilyapopov27@gmail.com)
Университет ИТМО, аспирант.
г. Санкт-Петербург

Карманов / Karmanov A.

Андрей Геннадиевич
(karmanov.nip@gmail.com)
кандидат технических наук, доцент.
Университет ИТМО, доцент ГИС.
г. Санкт-Петербург

Карманова / Karmanova N.

Наталья Андреевна
(natali.karmanova@gmail.com)
Университет ИТМО, лаборант.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: информационная безопасность – IT security; сетевые атаки – network attacks; машинное обучение – machine learning; анализ данных – data analysis.

В статье описывается метод детектирования атак, включающий в себя генерацию наборов вредоносного трафика и трафика легитимных пользователей, а также проводится оценка возможности применения алгоритмов классификации на основе машинного обучения с учителем для детектирования сетевых распределенных атак типа «отказ в обслуживании».

The article describes attack-detection method including generation of malicious traffic and legitimate users traffic patterns and assesses the possibility of using classification algorithms based on machine learning with a tutor targeted at detection of service denial-type distributed attacks.

Введение

В настоящее время наблюдается рост количества распределенных атак на глобальные компьютерные сети, значительная часть из которых приходится на атаки типа «Отказ в обслуживании» (DDoS). По данным российской компании Qrator Labs, уже сейчас проводятся реальные DDoS-атаки до 1 Тбит/с, значительно увеличивается количество сложных атак на протоколы прикладного уровня [7, 9]. DDoS-атаки влияют на один из основополагающих принципов информационной безопасности – доступность информационных ресурсов [22]. В каждом конкретном случае DDoS может либо непосредственно причинить вред, либо создать

угрозу и потенциальный риск нанесения убытков. Атакам такого рода могут быть подвержены любые сетевые ресурсы, вне зависимости от их владельцев и направления деятельности [10, 19]. Таким образом, одним из наиболее актуальных на сегодняшний день направлений в области информационной безопасности является противодействие DDoS-атакам, в том числе разработка средств защиты, способных справиться со сложными высокоскоростными атаками [2, 21].

Целью работы является рассмотрение существующих алгоритмов классификации данных на основе машинного обучения, проведение оценки их эффективности и разработка метода детектирования сетевых распределенных атак типа «Отказ в обслуживании» с помощью алгоритмов машинного обучения.

В работе рассмотрены существующие алгоритмы классификации данных на основе машинного обучения, проведена оценка их эффективности и разработан метод детектирования сетевых распределенных атак типа «Отказ в обслуживании» с помощью алгоритмов машинного обучения.

Применение машинного обучения в детектировании сетевых атак

Говоря об автоматизации в современных средствах защиты от DDoS-атак, практически всегда подразумевается использование машинного обучения. Если большинство из низкоуровневых типов DDoS-атак можно обнаружить и нейтрализовать при помощи методов «грубой силы», то при защите от атак прикладного уровня невозможно обойтись без применения алгоритмов машинного обучения. При L7-атаках в сторону

защищаемого приложения поступает большое количество сетевых пакетов со множеством атрибутов [20]. Необходимо уметь разделять запросы от ботов и реальных пользователей. В решении этой задачи наиболее эффективным считается использование машинного обучения [4].

Для повышения эффективности процессов обнаружения и противодействия DDoS-атакам было проведено исследование того, как алгоритмы машинного обучения могут быть использованы для противодействия DDoS-атакам при их применении в автоматизированных системах защиты.

Использование механизмов машинного обучения помогает решить проблему обнаружения DDoS-атак как с помощью алгоритмов обучения с учителем, так и без учителя. Первый метод обладает более высокой точностью обнаружения, когда имеются точные и корректные атрибуты атак, но не может обнаруживать неизвестные атаки. Второй, напротив, может помочь в обнаружении неизвестных атак, однако он значительно теряет эффективность при наличии шумов и большого количества ложных данных. Также методы обучения без учителя, как правило, не могут работать в реальном времени, так как требуют более серьезной и продолжительной обработки данных [16].

В данной работе были использованы классификаторы на основе алгоритмов дерева решений, k -ближайших соседей и случайного леса из библиотеки машинного обучения *scikit-learn*. Полный перечень программных инструментов, использованных в работе, приведен в табл. 1.

Задача классификации. Задача классификации формулируется следующим образом: на основе обучающей выборки сетевого трафика T_s найти функцию $f(x)$ от входных параметров, которая при наименьшем количестве ошибочно классифицированных пакетов

предсказывает результирующий класс атаки y для любых новых значений x . Выходные значения берутся из дискретного множества $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, включающего все predetermined значения классов. Иными словами,

$$\exists f : X \rightarrow Y,$$

где X – это набор векторов атрибутов сетевых пакетов, Y – набор наименований классов DDoS-атак. Значения целевой зависимости f известны только на объектах конечной обучающей выборки:

$$x^m = \{(x_1, x_2), \dots, (x_m, y_m)\}.$$

Требуется найти такой алгоритм

$$a : X \rightarrow Y,$$

который способен классифицировать произвольный объект $x \in X$. В качестве атрибутов классификации должны использоваться атрибуты пакетов сетевого, транспортного и прикладного уровней модели OSI.

Алгоритм k -ближайших соседей. Построение модели классификации на основе алгоритма k ближайших соседей заключается в запоминании обучающей выборки данных. Для того чтобы сделать прогноз для нового экземпляра данных, алгоритм выполняет поиск ближайшей к ней точки обучающей выборки, тем самым находя “ближайших соседей”. Новому экземпляру присваивается метка, принадлежащая ближайшей точке обучающего набора. Алгоритм позволяет рассматривать не одного ближайшего соседа, а их произвольное количество (k), отсюда происходит название алгоритма. Пусть дана обучающая выборка с парами вида «объект-ответ»:

Таблица 1

Программные инструменты, используемые для построения модели классификации

Модуль	Применение
pandas	Первичная обработка данных, работа с размеченными данными, формирование датафреймов. Работает в связке с NumPy, и помимо математических вычислений обеспечивает их агрегацию и визуализацию
sklearn	Отбор признаков, реализация алгоритмов классификации
numpy	Выполнение основных операций над n-массивами и матрицами. Использование механизмов векторизации NumPy повышает производительность и ускоряет выполнение операций над данными
matplotlib	Визуализация данных, формирование графиков и диаграмм

$$x^m = \{(x_1, x_2), \dots, (x_m, y_m)\}.$$

Пусть на множестве объектов задана функция расстояния $p(x, x')$, которая должна быть достаточно адекватной моделью сходства объектов, то есть чем больше значение этой функции, тем менее схожими являются объекты x, x' . Для произвольного u расположим объекты обучающей выборки x_i в порядке возрастания расстояний до u :

$$p(u, x_{1;u}) \leq p(u, x_{2;u}) \leq \dots \leq p(u, x_{m;u}),$$

где через $x_{i;u}$ – это объект обучающей выборки, который является i -м соседом объекта u . Аналогично введем обозначение $y_{i;u}$ для ответа на i -м соседе. Алгоритм ближайших соседей в наиболее общем виде выглядит так:

$$a(u) = \operatorname{argmax}_{i=1}^m [x_{i;u} = y] w(i, u),$$

где $w(i, u)$ – это заданная весовая функция, оценивающая степень важности i -го соседа при классификации объекта u . Эта функция должна быть неотрицательной и не возрастать по i -м.

Преимуществом использования алгоритма k -ближайших соседей является легкость интерпретации модели, а также приемлемое качество предсказания, которого можно добиться без применения большого количества настроек. Как правило, построение модели классификации на основе данного алгоритма происходит очень быстро, однако когда размер обучающей выборки становится очень большим, требуется дополнительное время для получения прогноза. Данный алгоритм работает не очень эффективно с наборами данных из сотен и более признаков, и совсем неэффективно в ситуации, когда подавляющее большинство признаков в большей части наблюдений имеют нулевые значения (такой набор данных называется *sparse dataset*, или разреженным). Таким образом, алгоритм k ближайших соседей не так часто используется на практике из-за относительно низкой скорости вычислений и неспособности к обработке большого количества признаков [5].

Деревья решений. Модели классификации и регрессии на основе деревьев решений выстраиваются через иерархию условий “если... то”, приводящую к решению. В машинном обучении такие условия называются *tests* (тесты). При построении дерева алгоритм перебирает все возможные тесты и находит наиболее информативный с точки зрения прогнозирования значений целевой переменной. Рекурсивное разбиение данных продолжается до тех пор, пока все точки данных на каждом листе дерева решений не будут принадлежать одному значению целевой переменной [12]. В результате такого процесса строится дерево, каждый узел которого соответствует определенному тесту. Лист дерева, который содержит точки, относящиеся к одному и тому же значению целевой переменной, будет называться чистым.

Пусть дано обучающее множество, которое содержит K примеров и N классов. Для оценки эффективности разделения, полученного на основе конкретного атрибута, введем показатель $Q(svt)$, где s – идентификатор разбиения, а t – идентификатор узла. Тогда можно записать [8]:

$$W(s \vee t) = 2 \cdot P_L \cdot P_R \sum_{j=1}^N (P(j \vee t_L) - P(j \vee t_R)),$$

где t_L и t_R – левый и правый потомки узла t соответственно, P_L и P_R – отношение количества примеров в левом и правом потомках к их общему количеству в обучающем множестве, $P(j \vee t_L)$ и $P(j \vee t_R)$ – отношение количества примеров класса j в левом и правом потомках к их общему количеству в каждом из них.

Алгоритм дерева решений обладает высокой скоростью работы и не требует масштабирования данных, результаты классификации легко визуализируются [3].

Случайный лес. Основным недостатком деревьев решений – это склонность к переобучению. Одним из способов решения этой проблемы является алгоритм случайного леса [15]. Случайный лес представляет собой набор деревьев решений, в котором каждое дерево немного отличается по параметрам от остальных. Суть заключается в том, что каждое дерево решений хорошо прогнозирует, но, вероятно, переобучается на части данных. Если построить большое количество деревьев решений, которые хорошо отрабатывают и переобучаются с разной степенью, то можно уменьшить переобучение через усреднение их результатов. Для описания указанной стратегии строится множество деревьев решений, которые прогнозируют целевую переменную на должном уровне и отличаются друг от друга. Алгоритм построения случайного леса, состоящего из N деревьев, выглядит следующим образом [6]:

- для каждого $n = 1, \dots, N$ генерируется выборка X_n , по которой строится решающее дерево;
- по заданному критерию выбирается лучший признак, по которому проводится разбиение дерева (до исчерпания выборки);
- дерево строится до тех пор, пока в каждом из листьев будет не более n_{\min} объектов или пока не будет достигнута определенная глубина дерева;
- при каждом разбиении сначала выбирается m случайных признаков из n исходных;
- поиск оптимального разделения выборки проводится только среди них.

Итоговый классификатор выглядит так:

$$a(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i(x),$$

иначе говоря, для задачи классификации выбирается решение голосованием по большинству.

Чаще всего алгоритм случайного леса работает лучше, чем одно дерево решений, не требует масштабирования данных, однако плохо обрабатывает разреженные и высокоразмерные данные [3].

Описание разработанного метода

Разработанный метод состоит из следующих этапов:

1. формирование выборки трафика защищаемого приложения;
2. формирование выборки легитимного трафика;
3. разделение выборок на обучающую и тестовую;
4. выделение наиболее информативных признаков (атрибутов сетевого трафика);
5. фаза обучения;
6. оптимизация алгоритма;
7. оценка результатов классификации.

На рис. 1 описан процесс обучения и последующей проверки модели при построении алгоритма классификации.

Формирование выборок сетевого трафика. Для проведения классификации необходимо наличие признаков, характеризующих класс, к которому принадлежит та или иная атака. Исходными данными для решения этой задачи являлись выборки сетевого трафика, собранные с помощью библиотек, обеспечивающих взаимодействие с драйвером сетевого интерфейса.

В ходе выполнения работы было выявлено, что атрибуты сетевого трафика при проведении одного и того же типа атаки могут отличаться в зависимости от программных инструментов, используемых злоумышленником. Вследствие этого в процессе сбора данных для обучения было задействовано несколько программных средств для каждого типа атак (табл. 2), что повысило разнообразие сетевого трафика и позволило точнее выделить информативные признаки.

При построении модели классификации использу-

ются метрики из заголовков HTTP-запросов (7 уровень модели OSI), заголовков TCP-пакетов (4 уровень) и IP-пакетов (3 уровень). Это обеспечивает наиболее широкий спектр данных для анализа и, как следствие, более высокую вероятность нахождения признаков, которые могут быть использованы для успешной и эффективной классификации сетевого трафика [13, 14].

Собранный сетевой трафик состоял из нескольких типов данных:

1. трафика различных DDoS-атак, сгенерированных с помощью скриптов и программ, перечисленных в табл. 2;
2. легитимных запросов к защищаемому устройству, в том числе пакетов, необходимых для работы устройства, которыми обмениваются установленные на нем сервисы.

Далее формируются две выборки с данными (обучающая и тестовая) в отношении 70/30. Перед разбиением набор данных был перемешан с помощью генератора псевдослучайных чисел. Это сделано для того, чтобы избежать отбора экземпляров, относящихся только к одному классу (например, если мы возьмем последние 30% экземпляров в качестве тестового набора, то все они будут иметь одинаковую метку, так как сортировка идет именно по ним). Использование тестового набора, содержащего только один класс, не даст возможность объективно судить об обобщающей способности модели классификации. Следует отметить, что был выполнен перебор значений параметров и выбор тех комбинаций, которые дают максимальную точность на тестовом наборе данных, и это не означает, что на новых данных точность будет аналогичной. Если тестовый

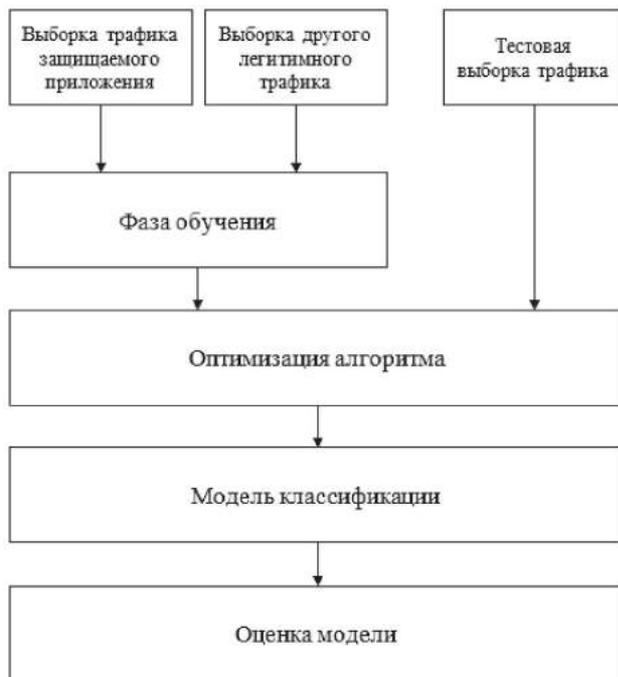


Рис. 1. Процесс обучения и проверки модели классификации

набор был применен для настройки параметров, то его использование для оценки качества модели не представляется возможным. По этой же причине данные разбиты на обучающую и тестовую выборки (рис. 2).

В дальнейшем к обучающей выборке применяются алгоритмы классификации, результаты работы которых дают возможность получить необходимые признаки и диапазоны их значений для работы с тестовой выборкой.

Выделение наиболее информативных признаков. Следующей важной процедурой предварительной обработки данных является отбор наиболее информативных признаков. Его цель состояла в отборе наиболее значимых признаков для решения рассматриваемой задачи классификации. Это позволило построить более простые модели классификации с лучшей обобщающей способностью, а следовательно, ускорить работу модели классификации, а также улучшить качество предсказания за счет устранения шумовых признаков [11]. Отбор признаков проводился как вручную, при помощи экспертных знаний (исключались признаки, которые не могут указывать на вредоносный характер трафика), так и при помощи автоматизированного алгоритма.

Автоматизированное вычисление важности каждого признака осуществлялось через отбор признаков на основе модели. Модель машинного обучения с учителем, использованная для отбора признаков, не применялась для создания итоговой модели. Было проведено вычисление определенного показателя важности для всех признаков для последующего ранжирования характеристик по этой метрике.

Отбор признаков на основе модели рассматривал все признаки сразу и поэтому мог обнаружить взаимодействия, когда модель была способна их выявить. По окончании процедуры отбора каждый признак получил значение, которое выражает степень его информативности (сумма всех значений равна 1). Чем выше

значение, тем ценнее этот признак для классификации.

В результате получен перечень признаков, которые можно ранжировать в соответствии с их значимостью для решения задачи классификации.

Поиск оптимальных параметров модели. Автоматизированный поиск оптимальных значений параметров и оценка модели проводятся путем использования связки решетчатого поиска с комбинированной проверкой и 5-блочной кросс-валидации [1]. Процесс отбора параметров и последующей оценки модели представлен на рис. 3.

Алгоритм 5-блочной кросс-валидации разбивает данные несколько раз, выстраивая соответствующее количество моделей. Сначала данные разбиваются на 5 частей одинакового размера, называемых блоками. Далее строится последовательность из моделей, где первая модель обучается используя первый блок в качестве тестовой выборки, а остальные блоки (2–5) выполняют роль обучающей выборки (рис. 4). Аналогичные процессы построения моделей повторяются для всех остальных блоков. Первая из пяти частей данных формирует первый блок, вторая из пяти частей данных – второй блок и так далее. Таким образом, вычисляется средняя для всех разбиений величина ошибки на контрольных подвыборках [17,18].

Решетчатый поиск с комбинированной проверкой позволяет осуществить нахождение лучшего набора параметров, доставляющих минимум ошибок перекрестного контроля.

Тестирование. Благодаря описанным выше операциям были построены и оптимизированы классификаторы сетевого трафика на основе трех алгоритмов машинного обучения. Результаты проверки их работы на тестовой выборке представлены в сравнительной таблице (табл. 3). Наилучшие результаты на тестовых выборках показал алгоритм случайного леса (95%)

Таблица 2

Используемые утилиты для генерации DDoS-трафика

Медленные атаки	<i>torshammer, slowhttptest, sockstress</i>
Атаки HTTP-flood	<i>torshammer, goldeneye, ddosim</i>
Атаки на стек TCP	<i>hping3, sikekiller, sprut</i>
Атаки UDP-flood	<i>hping3, fudp</i>
Атаки через SSL	<i>thc-ssl-dos, sslstrip</i>
Amplification-атаки	<i>saddam, chargen_amp, ufonet</i>
Атаки ICMP-flood	<i>hping3, hyenae</i>

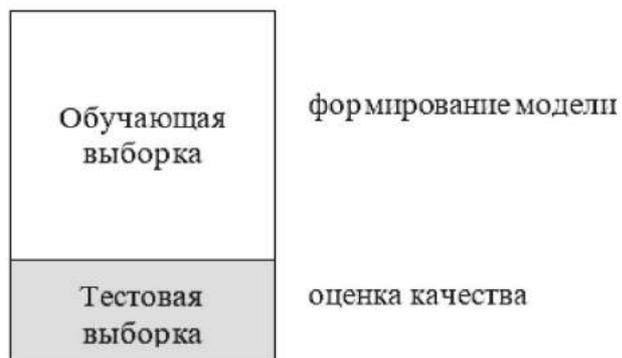


Рис. 2. Разделение на обучающую и тестовую выборки



Рис. 3. Процесс отбора параметров и оценки модели

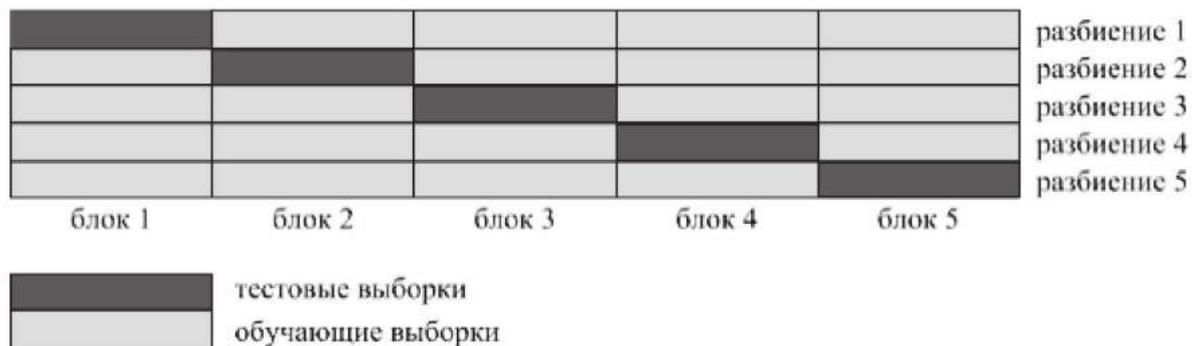


Рис. 4. Разбиение данных при 5-блочной кросс-валидации

Таблица 3

Сравнительная таблица классификаторов сетевого трафика

Алгоритм	До оптимизации	После оптимизации
Дерево решений	86%	91%
<i>k</i> -ближайших соседей	91%	94%
Случайный лес	93%	95%

Во всех трех случаях примененные методы позволили определить наиболее оптимальные параметры моделей и повысить точность классификации сетевого трафика дополнительно на 2–5%.

Заключение

В ходе работы были рассмотрены существующие алгоритмы классификации данных на основе машинного обучения, проведена оценка возможности их применения для детектирования сетевых распределенных атак типа «отказ в обслуживании». Наилучшие результаты на тестовых данных показал алгоритм случайного леса (95%). Результаты исследования применяются в работе по созданию автоматизированной программно-аппаратной платформы защиты от 40 Гбит/с DDoS-атак на основе сетевых плат FPGA PCI-E.

Литература

- Müller, A. C. Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists / Andreas C. Müller, Sarah Guido. – San Francisco: O'Reilly Media, 2016. – P. 268–328
- Bhattacharyya, D. K. DDoS Attacks: Evolution, Detection, Prevention, Reaction, and Tolerance / Dhruva Kumar Bhattacharyya, Jugal Kumar Kalita. – London: Chapman and Hall/CRC, 2016. – P. 23–70
- Garreta, R., Moncecchi G. Learning scikit-learn. Machine Learning in Python / R. Garreta. – Birmingham: Packt, 2013. P. 25–60
- DDoS-атаки и электронная коммерция: современные подходы к защите [Электронный ресурс] / 1-С Битрикс // Сайт Хабрахабр. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/bitrix/blog/267947>, свободный. – Загл. с экрана.
- Машинное обучение: метод ближайших соседей [Электронный ресурс] / Сайт MachineLearning.ru. – Режим доступа: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%B6%D0%B0%D0%B9%D1%88%D0%B5%D0%B3%D0%BE_%D1%81%D0%BE%D1%81%D0%B5%D0%B4%D0%B0, свободный. – Загл. с экрана.
- Обучение на размеченных данных. Случайные леса [Электронный ресурс] / Сайт coursera.org – Режим доступа: <https://ru.coursera.org/learn/supervised-learning/lecture/bejGu/sluchainyie-liesa>, свободный. – Загл. с экрана

- Отчет за 2017 год компании Qrator Labs [Электронный ресурс] / Компания Qrator Labs. – Режим доступа: <https://qrator.net/presentations/QratorAnnualRepRus.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
- Технологии анализа данных. Алгоритм CART [Электронный ресурс] / Компания BaseGroup Labs. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/32842822-Algorithm-cart-m-154.html>, свободный. – Загл. с экрана.
- Отчет по безопасности за 2016 год [Электронный ресурс] / Cisco Systems. – Режим доступа: https://www.cisco.com/c/dam/m/ru_ru/cisco_2016_asr_011116_ru.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
- Воробьева, А. А. История развития программно-аппаратных средств защиты информации / А.А. Воробьева, И.С. Пантюхин. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 62 с.
- Ерохин, С. Д. Влияние фонового трафика на эффективность классификации приложений методами машинного обучения / С.Д. Ерохин, А.В. Ванюшина // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 12. – С. 31–36.
- Кафтаников, И. Л. Особенности применения деревьев решений в задачах классификации / И.Л. Кафтаников, А.В. Парасич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 26–32.
- Зубриенко, Г. А. Методы оптимизации выборки данных для определения аномального трафика / Г.А. Зубриенко, О.Р. Лапонина // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Vol. 6, No. 3. – P. 1–8.
- Котов, В. Д. Современное состояние проблемы обнаружения сетевых вторжений / В.Д. Котов, В.И. Васильев // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 3. – С. 198–204.
- Чистяков, С. П. Случайные леса: обзор / С.П. Чистяков // Труды КарНЦ РАН. – 2013. – № 1. – С. 117–136.
- Мухамедиев, Р. И. Таксономия методов машинного обучения и оценка качества классификации и обучаемости [Электронный ресурс] / Р.И. Мухамедиев, Е.Л. Мухамедиева, Я.И. Кучин // Электронный журнал Cloud of science. – 2015. – Т. 2, №3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/taksonomiya-metodov-mashinnogo-obucheniya-i-otsenka-kachestva-klassifikatsii-i-obuchaemosti>, свободный. – Загл. с экрана.
- Воронцов, К. В. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов / К.В. Воронцов // Математические вопросы кибернетики / под ред. О.Б. Лупанов. – М.: Физматлит, 2004. – Т. 13. – С. 5–36.

18. Mullin, M. Complete Cross-Validation for Nearest Neighbor Classifiers / M. Mullin, R. Sukthankar // Proceedings of International Conference on Machine Learning. – 2000. – P. 1137–1145.

19. Zargar, S. T. A survey of defense mechanisms against distributed denial of service (DDoS) flooding attacks / Saman Taghavi Zargar, James Joshi and David Tipper // IEEE communications surveys & tutorials 15.4 (2013): 2046–2069.

20. Gupta, Ms. Sh. Application Layer DDOS Attack: A Big Threat / Ms Shaveta Gupta, Dr. Dinesh Grover // Streames Info-Ocean. – June 2016. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 30–43.

21. Пантюхин, И. С. Методика проведения постинцидентного внутреннего аудита средств вычислительной техники / И.С. Пантюхин, И.А. Зикратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 467–474. – doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-467-474.

22. Pantiukhin, I. Basics of Computer Forensics / I. Pantiukhin, D. Shidakova // Вестник полиции. – 2016. – № 1 (7). – С. 20–29.

Синтез пассивной многопозиционной радиолокационной системы на базе группировки малых космических аппаратов

Design of passive multi-station radar system based on small-sized satellites constellation

Скоруходов / Skorokhodov Ya.

Ярослав Анатольевич

(yaroslavskor@gmail.com)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ,

начальник лаборатории военного института

(научно-исследовательского).

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космические системы – space systems; малый космический аппарат – small-sized satellite; радиолокация – radar; разностно-дальномерный способ – difference-ranging method; имитационной моделирование – simulation modeling.

В работе представлен комплекс алгоритмов оценивания целевых показателей функционирования пассивных многопозиционных радиолокационных систем землеобзора и их синтеза на основе модельно-кибернетических экспериментов. Оптимизируемой величиной является один из параметров орбитального движения космических аппаратов (высота орбиты или расстояние между спутниками), образующих баллистически связанную группу, при соблюдении условия определения координат источников радиоизлучений с точностью в среднем не ниже заданной.

The article presents simulation and algorithmic procedure for estimating target performance indicators of passive multi-station radar earth survey systems and their design based on model cybernetic experiments. The optimizable value is one of the satellites orbital motion parameters (orbit height or distance between satellites) forming a ballistic related group, provided that the conditions for determining the radio emission sources coordinates have been met with an accuracy not lower than the targeted one.

Введение

В настоящее время радиолокационные системы нашли широкое применение в различных сферах человеческой деятельности, в первую очередь, в интересах информационного обеспечения вооруженных сил, в частности для предупреждения о ракетном нападении, определения местоположения военной техники вероятного противника, наведения оружия. Число решаемых научных и народно-хозяйственных

задач с использованием радиолокационных методов растет с каждым годом в критически важных областях, таких как управление воздушным движением, поиск и спасение терпящих бедствие морских и воздушных судов, сельское и лесное хозяйство, геодезия и география, океанография, гидрология [1, 2, 5, 12].

Глобальность и непрерывность наблюдения земной поверхности может быть обеспечена применением многоспутниковых космических систем, баллистическая структура которых зависит от принятого метода определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ). Комплексный анализ методов радиолокации с целью определения эффективности их реализации на базе группировки малых космических аппаратов (КА) позволил сделать вывод, что наиболее пригодным является разностно-дальномерный метод [2, 3, 5, 6, 12, 14].

В разностно-дальномерных системах измеряемым параметром является разность расстояний объекта между ведущим и ведомыми приемниками сигналов, разнесенных в пространстве, а расстояние между ними именуется базой. Временные задержки сигналов можно вычислять корреляционно-экстремальным методом. Тогда необходимо ретранслировать полный поток информации (весь диапазон частот Ω) или децимированный (в полосе $\omega < \Omega$) с ведомого КА на опорный КА, что повышает требования к пропускной способности канала межспутниковой связи и бортовой аппаратуре. Другой способ определения временных задержек состоит в фиксации моментов времени приема импульсных сигналов каждым из КА, синхронизированных между собой, и их последующий разности. Привязка шкал времени и координат спутников может быть обеспечена существующими навигационными системами, в частности ГЛОНАСС [3].

Анализ работ в части синтеза орбитальных структур многоспутниковых радиолокационных систем выявил

недостаточную проработанность вопросов оценивания целевых показателей их функционирования и обоснования соответствующих требований. Точность определения координат ИРИ в системе показателей применения космической системы землеобзора до сих пор не рассматривалась.

Целью работы является разработка модельно-алгоритмического комплекса оценивания целевых показателей функционирования космических многопозиционных радиолокационных систем землеобзора, а также выбора параметров орбитальной структуры баллистически связанной группы КА (высоты орбиты или расстояния между КА) с учетом требований к точности определения местоположения ИРИ.

Точность σ_r определения местоположения ИРИ зависит от высоты h орбиты, количества m КА в группе, размера d базы, погрешности σ_r определения момента времени приема сигналов. Таким образом, критерий оптимального выбора параметров размещения КА (размера d базы при заданных значениях числа КА, высоты h орбиты, погрешности σ_r и точности σ_r), составляющих баллистически связанную группу, имеет вид

$$G_o: \sigma_r \in \{\sigma_r^o\} \cap h \in \{h^o\} \cap \sigma_r \in \{\sigma_r^o\} \cap d = d^{opt} \cong U, \quad (1)$$

где $\{x_i^o\}$ – область допустимых значений i -й характеристики, $x_1^o = \sigma_r^o, x_2^o = h^o, x_3^o = \sigma_r^o$;

d^{opt} – оптимальное значение размера базы

$$d^{opt} = \min \{d : \sigma_r(\sigma_r, m, h, d) = \sigma_r^o\};$$

U – истинное высказывание (достоверное событие).

Вектор целевых показателей функционирования космической системы имеет следующий вид

$$Y_{< >} = \langle t_0, T_1, T_2, \sigma_r \rangle,$$

где t_0 – среднее время первого обнаружения ИРИ;

T_1 – периодичность контроля;

T_2 – длительность пребывания ИРИ в зоне покрытия орбитальной группировки (ОГ).

Структура многопозиционной радиолокационной системы на базе группировки малых КА выбирается с учетом следующего критерия пригодности

$$G_{np}: Y \in \{Y^o\} \cong U, \quad (2)$$

где $\{Y^o\}$ – область допустимых значений вектора целевых показателей функционирования космической системы (КС), $\{Y^o\} = \{ \langle y_1^o, y_2^o, y_3^o, y_4^o \rangle \}$;

$\{y_j^o\}$ – область допустимых значений j -го показателя целевого функционирования КС,

$$y_1^o = t_0^o, y_2^o = T_1^o, y_3^o = T_2^o, y_4^o = \sigma_r^o.$$

Данная задача решается итерационно с использованием методов последовательной оптимизации путем

выбора количества орбитальных плоскостей и размещения баллистически связанных групп в каждой из них.

Оценивание точности определения местоположения источников радиоизлучения многопозиционной системой космического базирования разностно-дальномерным способом

Для определения местоположения ИРИ в пространстве (без использования уравнения земной поверхности) требуется минимум четыре синхронизированных приемника излучения. При этом координаты источника радиоизлучения позиционным методом определяются точкой пересечения поверхностей положения различных семейств путем решения системы нелинейных уравнений аналитически (в частных случаях) или итерационно [3, 4, 7, 9, 13, 14, 15]. Следовательно, погрешность оценивания координат источника радиоизлучения зависит от погрешностей определения линий положения.

Значение среднеквадратического отклонения σ_r радиальной погрешности оценивания местоположения ИРИ с учетом некоррелированности погрешностей измерения линий положения определяется выражением (рис. 1) [3]

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N 1/\sigma_{li}^2}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N \frac{\sin^2(\alpha_{ik})}{\sigma_{li}^2 \sigma_{lk}^2}} \quad (3)$$

где σ_{li}^2 – среднеквадратическое отклонение измерения линий положения с использованием опорного и i -го ведомого КА;

α_{ik} – угол пересечений i -й и k -й линий положения;

N – количество баз в системе.

В частном случае при количестве баз $N = 2$ выражение (3) преобразуется к виду

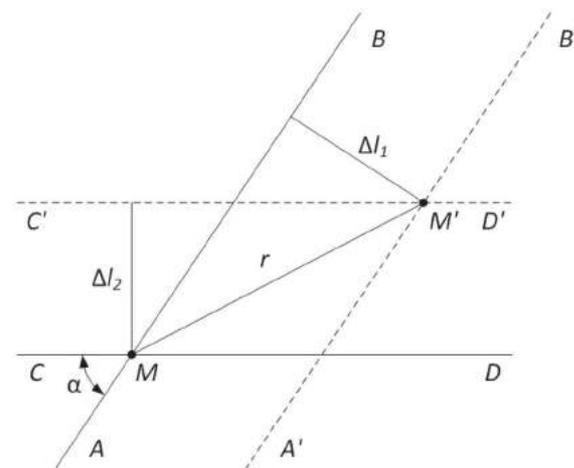


Рис. 1. Радиальная погрешность определения местоположения источника излучения на плоскости

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{l1}^2 + \sigma_{l2}^2}}{\sin(\alpha)} \quad (4)$$

Формула (4) показывает, что точность определения местоположения источника излучения растет при уменьшении погрешностей σ_{l1} , σ_{l2} оценивания линий положения и приближении угла α пересечения линий положения к 90° .

Выражение для определения значения среднеквадратического отклонения погрешности измерения линии положения имеет вид [5]

$$\sigma_l = \frac{c\sigma_\tau}{2\sin(\psi/2)}, \quad (5)$$

где σ_τ – среднеквадратическое отклонение погрешности измерения временной задержки сигнала;

ψ – угол, под которым из точки расположения ИРИ видна база (рис. 2).

Угол α_{ik} пересечения линий положения приближенно можно определить через углы ψ_i и ψ_k между направлением на i -й и опорный КА и k -й и опорный КА относительно источника излучения соответственно [5]

$$\alpha_{ik} = (\psi_i + \psi_k)/2. \quad (6)$$

Таким образом, выражения (3), (5) и (6) позволяют рассчитать погрешность определения местоположения ИРИ, имея значения углов ψ_i , $i = 1, \dots, N$ и среднеквадратического отклонения σ_τ погрешности измерения временной задержки сигнала.

Алгоритм оценивания целевых показателей функционирования многопозиционной радиолокационной системы на базе группировки малых КА

С целью выбора конфигурации многопозиционной радиолокационной космической системы, удовлетворяющей заданным требованиям, предъявляемым, в частности, к точности измерения местоположения ИРИ на земной поверхности, проводился модельно-кибернетический эксперимент, состоящих из нескольких этапов. На первом этапе оценивалась среднеквадратическая погрешность определения местоположения ИРИ для различных значений высоты h орбиты и расстояния d между опорным и ведомыми КА (базы). Суть второго этапа заключалась в определении целевых показателей космической системы, таких как среднее время первого обнаружения источника излучения, периодичности контроля, длительности пребывания объекта в зоне покрытия ОГ и других, с использованием в качестве исходных данных параметров размещения КА (высоты орбиты h и базы d) значений, полученных на предыдущем этапе эксперимента с учетом критерия оптимальности (1).

Исходными данными для оценивания точности определения местоположения ИРИ на земной поверхности

являются количество n моделируемых целей (количество испытаний), среднеквадратическое отклонение σ_τ погрешности измерения временной задержки сигнала, минимальное, максимальное значения h^{\min} , h^{\max} высоты орбиты и приращение Δh , минимальное, максимальное значения d^{\min} , d^{\max} базы и приращение Δd .

Алгоритм включает следующие шаги. Рассчитывается положение опорного КА на круговой орбите, при этом высота h орбиты выбирается из множества $\{h_k\}$, $h_k = h^{\min} + k \cdot \Delta h$, $k=0, \dots, (h^{\max} - h^{\min}) / \Delta h$, а значения остальных параметров, определяющих положение опорного КА в пространстве (наклона i , долготы восходящего узла ω орбиты и истинной аномалии КА) – произвольным образом. Положения ведомых КА вычисляются таким образом, чтобы, при следовании по той же орбите, что и опорный КА, расстояние между опорным КА и каждым из ведомых равнялось размеру базы $d_m = d^{\min} + m \cdot \Delta d$, $m = 0, \dots, (d^{\max} - d^{\min}) / \Delta d$.

Генерируется заданное количество n целей с равномерным распределением в зоне покрытия опорного КА. Для каждого ИРИ с номером $i = 1, \dots, n$, определяется индикатор $v_j(i)$ наблюдаемости ИРИ КА r_j , $j=1, \dots, M$ (КА с индексом 0 является опорным, индикатор $v_0(i)=1$ и рассчитывать его не требуется), принимающей значение, равное 1, если угол места КА r в топоцентрической пунктовой системе координат [8], начало которой совпадает с местоположением ИРИ i , имеет положительное значение. Если выполняется условие $v(i) = \prod_j v_j(i) = 1$, то, исходя из реализовавшейся геометрии (взаимного расположения ИРИ s_i и КА r_j , $j = 0, \dots, M$), рассчитываются углы ψ_i , $i = 1, \dots, N$ и, используя последовательно выражения (5), (6), (3), определяется значение среднеквадратического отклонения определения местоположения ИРИ.

Средняя точность определения местоположения целей многопозиционной системой с параметрами высоты h_k орбиты и размера базы d_m определяется путем усреднения полученных значений среднеквадратических отклонений

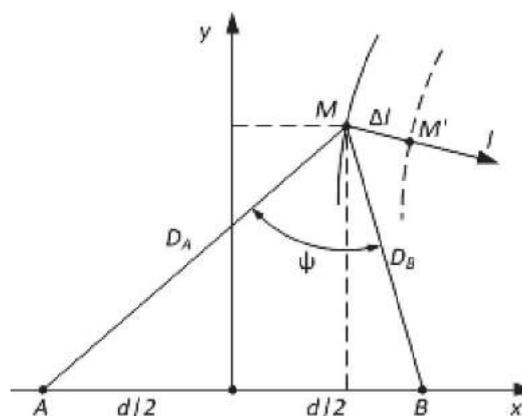


Рис. 2. Погрешность определения линии положения на плоскости

$$E[\sigma_r] = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_r(i)}{\sum_{i=1}^n v(i)}$$

$$\hat{E}_k[T_{1(2)}(i)] = \frac{T_{1(2)}(i)}{n_k(i)},$$

Результатом работы алгоритма является массив значений средней точности определения местоположения целей для каждой пары $\{h_k, d_m\}$, $k=0, \dots, (h^{\max} - h^{\min}) / \Delta h$, $m=0, \dots, (d^{\max} - d^{\min}) / \Delta d$.

Исходными данными второго этапа эксперимента являются множество источников излучений S , число n моделируемых целей, баллистическая структура группы КА $r_j \in R, j=0, 1, 2, \dots$, параметры которой выбирались на предыдущем этапе. Множество $S = \{s_i\}$ характеризует распределение источников излучений $s_i \in S, i=0, \dots, N_s$, в качестве которого, в частности, можно использовать модель радиоэлектронной обстановки, предложенную в работе [10, 11], или равномерное распределение.

Выбор распределения источников излучений S зависит от целей проведения экспериментальных исследований. В первом случае модель позволяет рассчитывать целевые показатели для территориального района или земной поверхности в целом с учетом реального размещения ИРИ, в ином случае производить их оценивание для заданной географической широты наблюдения.

Алгоритм оценивания целевых показателей функционирования радиолокационной КС для заданного района на земной поверхности состоит из следующей последовательности шагов. Из множества $S = \{s_i\}$ источников излучений $N_s = \text{card}\langle S \rangle$, характеризующего радиоэлектронную обстановку, случайным образом выбираются $n < N_s$ целей $s_i, i=0, \dots, n$. Таким образом, вероятность появления ИРИ больше в том месте, где плотность размещения точек выше. Для каждого ИРИ $s_i \in S, i=0, \dots, n, n < N_s$ производится цикл итераций моделирования функционирования ОГ с заданными параметрами баллистической структуры (количество орбитальных плоскостей, количество КА в каждой плоскости, углы на которые КА разнесены в каждой плоскости). Интервал T моделирования равен суткам ($T = 86400$ с), момент t_n начала моделирования варьируется в диапазоне от 0 до 86400 секунд с приращением dt , момент $t_n = 0$ соответствует положению КА на орбите с истинной аномалией опорного КА $\theta = 0^\circ$, тем самым обеспечивается необходимое разнообразие начальных положений КА, входящих в состав ОГ, не нарушая орбитальное построение космической системы.

Для каждой итерации с номером $k = 0, 1, \dots, 86400/dt$ вычисляются:

- время $t_{0k}(i)$ первого обнаружения ИРИ s_i на k -й итерации моделирования;
- количество $n_k(i)$ пребываний ИРИ s_i в зоне покрытия системы R ;
- средние значения $\hat{E}_k[T_1(i)], \hat{E}_k[T_2(i)]$ длительности пребывания ИРИ s_i в зоне покрытия и периодичности контроля (длительности пребывания вне зоны покрытия) на k -й итерации, соответственно, исходя из выражения

где $T_1(i)$ – длительность пребывания ИРИ s_i в зоне покрытия системы R (всех КА $r_j \in R, j=0, \dots, M$ в составе многопозиционной системы);

$T_2(i)$ – длительность пребывания ИРИ s_i вне зоны покрытия ОГ R ,

$$T_1 + T_2 = T;$$

– среднее значение погрешности $E_k[\sigma_r]$ определения местоположения ИРИ s_i на k -й итерации.

Кроме того, вычисляются некоторые другие характеристики, не рассматриваемые в настоящей работе с целью сокращения объема излагаемого материала.

После окончания моделирования функционирования КС для всех целей $s_i, i=0, \dots, n$ вычисляются следующие статистические характеристики целевых показателей функционирования системы для заданной структуры ОГ

– среднее время первого обнаружения

$$\hat{E}_k[t_{0k}] = \frac{dt}{n \cdot 86400} \sum_{i,k} t_{0k}(i);$$

– средняя длительность пребывания целей в зоне покрытия системы R (пребывания вне зоны покрытия)

$$\hat{E}[T_{1(2)}] = \frac{dt}{n \cdot 86400} \sum_{i,k} \hat{E}_k[T_{1(2)}(i)];$$

– средняя погрешность определения местоположения целей

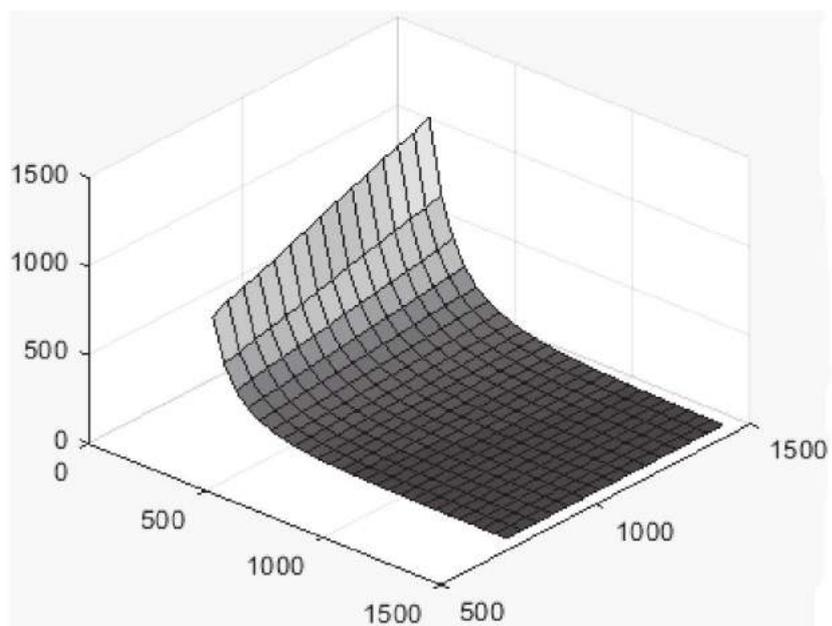
$$\hat{E}[\sigma_r] = \frac{dt}{n \cdot 86400} \sum_{i,k} \hat{E}_k[\sigma_r(i)].$$

В случае определения целевых показателей функционирования системы для заданной географической широты наблюдения ИРИ распределяются равномерно на одной долготе L и широте B , изменяющей в диапазоне от минимального до максимального значений с приращением равным ΔB . Последовательность шагов при этом остается неизменной.

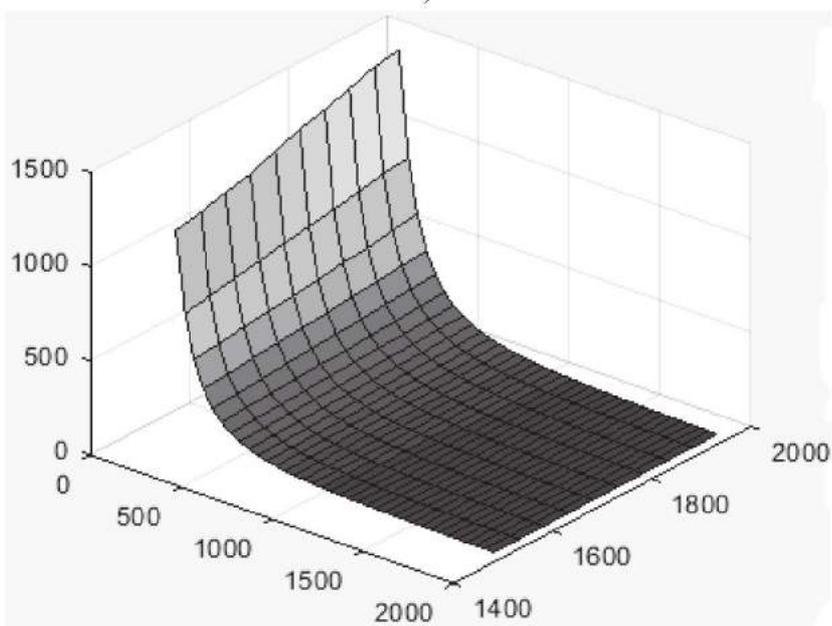
Результатом проведения эксперимента в целом являются целевые показатели функционирования радиолокационной космической системы, при этом используется разработанный научно-методический аппарат для моделирования и выбора параметров конфигурации ОГ малых КА.

Моделирование функционирования радиолокационной космической системы и практические рекомендации выбора параметров ее баллистической структуры

Исходными данными для моделирования являются высота орбиты h , размер базы d , количество КА, погрешность σ_r измерения времени задержки сигналов.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость погрешности σ_r оценивания местоположения ИРИ от размера базы d и высоты h орбиты группировки КА а) высота орбиты от 750 км до 1500 км; б) высота орбиты от 1500 км до 2000 км

Таблица 1

Оценки целевых показателей функционирования КС

№ п/п	Широта, град	Среднее время первого обнаружения ИРИ	Периодичность контроля	Среднее время нахождения ИРИ в зоне покрытия	Средняя точность, м
1	0	3 ч 53 м 25 с	4 ч 18 м 07 с	6 м 11 с	20,5
2	10	3 ч 51 м 33 с	4 ч 32 м 00 с	6 м 34 с	20,8
3	20	3 ч 18 м 58 с	3 ч 33 м 25 с	5 м 37 с	21,8
4	30	3 ч 31 м 16 с	3 ч 34 м 22 с	6 м 10 с	20,5
5	40	2 ч 48 м 15 с	2 ч 41 м 42 с	5 м 36 с	20,7
6	50	3 ч 18 м 09 с	2 ч 35 м 56 с	7 м 22 с	19,7
7	60	3 ч 21 м 18 с	2 ч 35 м 32 с	7 м 49 с	18,4
8	70	2 ч 37 м 43 с	2 ч 19 м 33 с	6 м 34 с	19,7
9	80	2 ч 41 м 05 с	2 ч 19 м 33 с	5 м 15 с	24,2

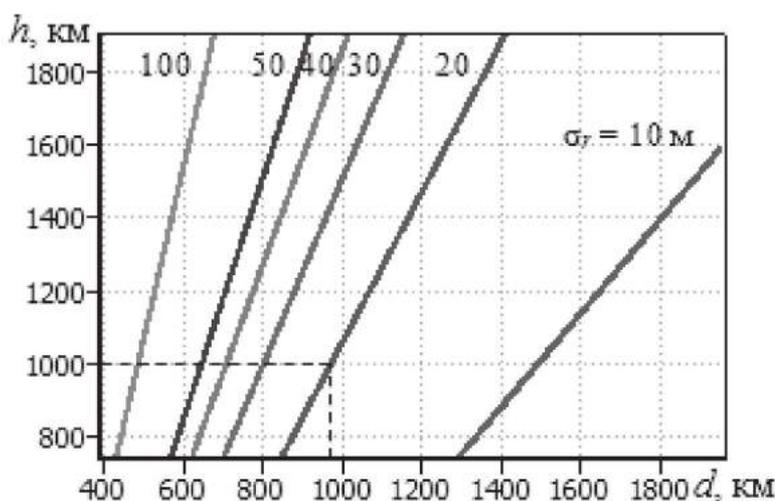


Рис. 4. Линии равных погрешностей определения местоположения ИРИ

Высоту h орбиты целесообразно выбирать с учетом минимизации влияния радиации на бортовую аппаратуру КА, поэтому диапазон ее изменения зависит от наличия радиационных поясов Земли и составляет от 750 до 2000 км [3]. Значение размера базы определяется условием одновременного наблюдения заданного участка земной поверхности всеми КА, составляющими баллистически связанную группу, и изменяется от 200 км до 2500 км. Погрешность σ_r определения моментов приема сигналов для современных радиоприемных устройств варьируется от 25 нс до 100 нс [3].

На рис. 3 представлены результаты статистических испытаний в виде поверхностей среднеквадратических отклонений измерения местоположения ИРИ при количестве баз $N = 2$ и значении среднеквадратического отклонения измерения времени задержки сигналов, равном $\sigma_t = 25$ нс.

В расчетах не учитывались погрешность определения собственного местоположения приемников сигналов, а также ошибки в тракте их обработки.

С использованием полученных результатов можно осуществить выбор значений высоты h орбиты при заданном значении размера базы d или, наоборот, размера базы d при заданном значении высоты h орбиты и удовлетворяющих требованиям точности σ_r определения местоположения целей. Данные зависимости хорошо аппроксимируются моделями линейной регрессии (рис. 4).

Таким образом, при задании требуемых точности определения местоположения ИРИ $\sigma_r = 20$ м и высоты орбиты $h = 1000$ км, которая в свою очередь может определяться условием превышения порогового значения отношения сигнал/шум, для минимального значения базы вычисляется значение, равное 971 км.

Полученные оценки целевых показателей функционирования КС, состоящей из трех КА, размещенных на круговой орбите с наклоном $i = 67^\circ$ и высотой $h = 1000$ км и разнесенных между собой в одной плоскости на расстояние $d = 971$ км, представлены в табл. 1.

Снижение высоты h орбиты и уменьшение размера базы d ведет к увеличению площади, в пределах которого определяется местоположение ИРИ (пересечения зон покрытия КА, входящих в состав группы), а соответственно и времени пребывания объекта в зоне покрытия. Улучшение целевых показателей функционирования КС достигается путем наращивания ОГ, а также оптимального выбора параметров орбитального движения баллистически связанных групп КА.

Заключение

В статье предлагается научно-методический аппарат выбора структуры многопозиционной пассивной радиолокационной системы на базе группировки малых космических аппаратов. Разработаны алгоритмы оценивания целевых показателей космических радиолокационных систем и их синтеза на основе выполнения экспериментов с использованием имитационных моделей.

Разработанные алгоритмы могут использоваться для обоснования тактико-технических требований, предъявляемых к космическим радиолокационным системам на этапе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Направлением дальнейших исследований является разработка методики оценивания точности определения местоположения источников радиоизлучения методом статистических испытаний алгоритмов измерения их координат.

Литература

1. Радиолокационные системы / В.В. Ахияров [и др.]. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 349 с.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба [и др.]. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Ворошилин, Е. П. Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов / Е.П. Ворошилин, М.В. Миронов, В.А. Громов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21). – С. 23–28.
4. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода / И.В. Гринь [и др.] // Техническая наука. Электроника, измерительная и радиотехника. – 2014. – № 4 (32). – С. 71–81.
5. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин [и др.]. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
6. Денисов, В. П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2001. – 251 с.

7. Моделирование М-позиционной пассивной разностно-дальномерной системы обнаружения сигналов и измерения координат источников радиоизлучения / В.П. Дубыкин [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 6–1. – С. 44–47.

8. Нариманов, Г. С. Основы теории полета космических аппаратов / Г.С. Нариманов. – М.: Машиностроение, 1972. – 608 с.

9. Измерение координат источников радиоизлучения многопозиционной пассивной разностно-дальномерной системой произвольной конфигурации / Б.В. Матвеев [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 5. – С. 114–119.

10. Скороходов, Я. А. Моделирование функционирования космического сегмента системы автоматической идентификации морских судов / Я.А. Скороходов, А.М. Андреев // Информационно-управляющие системы. – 2018. – В. 2(93). – С. 36–48. – DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.2.36.

11. Скороходов, Я. А. Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования / Я.А. Скороходов, Д.В. Малышев // Информация и Космос. – 2017. – № 4. – С. 37–141.

12. Кондратьев, В. С. Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

13. Фокин, Г. А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин Г.А., Абдулвахаб Хусейн Аль-Одхари // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41–46.

14. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

15. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич [и др.]. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

Геоинформационная система «Сочи ГИС-3D»

Геоинформационная система на основе использования 3D моделирования «Сочи ГИС-3D» была разработана в рамках подготовки проведения Зимних олимпийских игр 2014 года в Сочи и внедрена ЗАО «Институт телекоммуникаций» в 2009–2012 годах.

Цель создания Системы «Сочи ГИС-3D» – обеспечение геоинформационной поддержки работы подразделений и служб «ГК Олимпстрой», АНО «Оргкомитет «Сочи 2014», а также органов федерального, регионального и муниципального уровней за счет реализации современных технологий 3D-моделирования.

Система предназначена для сбора, хранения, анализа, графической визуализации пространственных данных и связанной с ними непространственной (атрибутивной) (семантической) информации о представленных в Системе объектах. Система включает в себя возможности СУБД, редакторов растровой и векторной графики, а также аналитических средств и применяется в картографии, геологии, метеорологии, землеустройстве, экологии, муниципальном управлении, транспорте, экономике, оборонной промышленности, системах поддержки принятия решений, ситуационных центрах, службах быстрого реагирования.

В настоящее время системой пользуются более 160 организаций и ведомств.



Система «Сочи ГИС-3D» обеспечивает:

- работу всех пользователей в едином геоинформационном пространстве;
- работу с информационной базой;
- работу с трехмерными картами и моделями городских объектов;
- проведение тематического ситуационного моделирования и выдачу рекомендаций для принятия решений руководству;
- доступ потребителей к информационным ресурсам через Web;
- работу пользователей в единой электронной системе документооборота;
- контроль доступа к данным и защиту информации.



Документом, подтверждающим внесение сведений о системе в единой реестр федеральных информационных систем, является электронный паспорт, выданный Министерством связи и массовых коммуникаций 4 февраля 2013 года.

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 № 294, от 10.01.2012 № 5)

Построение 3D-моделей ригидных объектов по одному изображению методом пространственных сеток

Design of 3D-models for rigid objects based on one image using spatial grid method

Казарян / Kazaryan M.

Маретта Левоновна

(marettak@bk.ru)

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор Российской академии естествознания. Владикавказский филиал ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» (Финансовый университет), заведующая кафедрой математики и информатики. г. Владикавказ

Шахраманьян / Shakhramanyan 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 Финансового университета, профессор кафедры математики и информатики. г. Владикавказ

Рихтер / Richter A.

Андрей Алексеевич

(7283763@mail.ru)

кандидат технических наук. ФГБНУ «Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», программист. г. Москва

Мурынин / Murynin A.

Александр Борисович

(AMurynin@bk.ru)

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», старший научный сотрудник. г. Москва

Ключевые слова: ригидный объект – rigid object; прямоугольная сетка – rectangular grid; ортотрансформированные изображения – ortho-transformed images; преобразования сдвига – shift transformation; преобразование поворота – rotation transformation; преобразование масштабирования – scaling.

Предлагается метод интерактивного построения трёхмерных моделей ригидных объектов по данным одного изображения с помощью координатных сеток и привязки частей объектов к ним при предположении о форме объекта. Описываются общие подходы к решению задачи. Приведена блок-схема метода построения 3D-модели и обрисованы основные этапы обработки. Показан математический аппарат метода, описана схема процедур построения контура (точек, линий, полигонов и полиэдров) трёхмерного объекта и его текстурного заполнения, пространственных преобразований объекта по одному изображению.

3D-models of rigid objects are proposed to be designed according to interactive method based on one image data using spatial grids with parts of the objects to be referenced to them assuming the shape of the object. General approaches to problem solving have been described. A block diagram of 3D-model design has been presented and main processing steps have been outlined. Mathematical tool of the method has been demonstrated. Procedure chart for designing the contour (points, lines, polygons and polyhedron) of a three-dimensional object and its texture filling, spatial transformations of the object based on a single image has been described.

Введение

Технология оценки рельефа местности по космическим изображениям к настоящему времени шагнула вперед: 3D-модели могут быть получены для местности и отдельных объектов поверхности планеты (причем не обязательно Земли); фигура и модели Земли и географических координат могут уточняться в зависимости от использованных методик и глубины расчета; расчет 3D-модели может проводиться дистанционно и без использования специального наземного оборудования; на базе разработанного матаппарата фотограмметрии формируются многочисленные методы оценки формы (объектов) и рельефа (местности), использующие те или иные исходные данные. Методы оценки 3D-моделей можно классифицировать на камеральные (измерительные) и аналитические. Первые основаны на измерениях стереоборудования (стереокомпараторов, высотмеров и др.), а вторые строятся по данным изображений и метаданным.

Краткий обзор существующих методов 3D-моделирования объектов земной поверхности по их изображениям

Построение трёхмерных (3D) моделей ригидных объектов по их изображениям можно проводить с использованием данных изображений и их метаданных [1–11]. Применение различных методик построения 3D-моделей по изображениям также может быть осуществлено соответствующим программным обеспечением (Sketch Up, 3ds-max и др.) [12, 13]. Для большинства методов требуется большое количество исходной информации, в том числе дорогостоящей и малодоступной.

Методы построения 3D-моделей ригидных объектов по изображениям можно условно разделить на три класса.

Для методов первого класса, основанных на оценке рельефа по стереопаре, требуется наличие двух и более исходных снимков, снятых строго для одной территории с помощью специального оборудования. Стереоснимки, полученные радиометрами, устанавливаемыми на космические спутники ДЗЗ, дорогие и не всегда доступны для области наблюдения [14].

Методы второго класса, основанные на данных одного снимка и его метаданных, несмотря на использование только одного снимка, требуют дополнительной информации о нём: параметры освещенности и тени, угла фотографирования и др. Т.е. при отсутствии необходимых сведений об изображении по этим методам оценку 3D-модели произвести, как правило, затруднительно. К тому же многие из данных методов связаны с определенными объектами, условиями съемки или типами снимков [15, 16].

Методы третьего класса берут в основу два и более снимка близкой территории. Такую съемку можно осуществить без наличия каких-либо профессиональных навыков или специального оборудования. Для таких методов затраты времени на обработку в среднем больше, чем для других [17–19].

Разработка методов оценки 3D-объектов по одиночным изображениям активно ведётся в последние годы. Известен подход к автоматизированному получению моделей зданий, использующий связь обработки 2D-изображения и 3D-моделирования зданий, которые классифицируются по типу крыши [18, 20–22]. Известен также метод получения информации о размерах трехмерных объектов по геометрическим характеристикам теней от объектов на изображениях [15, 16, 23].

Предлагаемый в настоящей работе подход предназначен для получения трехмерной модели наблюдаемого ригидного объекта по данным одного изображения без привлечения атрибутивной информации об этих объектах и их изображениях.

Постановка задачи

Дано единственное изображение некоторого трёхмерного объекта без атрибутивной информации. При этом имеется априорная информация о форме этого объекта и некоторый способ соотнести местоположения ряда точек этой формы с пикселями изображения. Исходя из этого требуется восстановить размеры, положение и ориентацию объекта. Предлагаемый метод решения задачи основан на наложении на изображение объекта сетки линий с заданной структурой. В целом порядок построения 3D-модели объекта состоит из следующих процедур:

1. Выбор объекта и его формы на изображении.
2. Разметка опорных точек на изображении.
3. Расчёт геометрических размеров сетки.
4. Привязка сетки к изображению объекта.
5. Построение элементов объекта на сетке.
6. Закраска элементов объекта.

Форма объекта моделируется сеткой линий, натянутой на его поверхность (здесь далее координатная сетка). Самая простая, базовая форма сетки прямоугольная, расположенная на трёх гранях прямоугольного параллелепипеда, имеющих общую точку, состоящая из линий, параллельных его рёбрам. Более сложные формы предлагается получить из этой при помощи ряда преобразований, описанных далее. Сетка может состоять из разного числа линий. Сетка, как и сам объект, существует в пространстве. При проецировании на плоскость изображения элементы сетки сопоставляются с его пикселями. Отыскав каким-либо способом пиксели, соответствующие элементам сетки, например, отметив на изображении рёбра прямоугольного здания, можно решить задачу определения его положения, ориентации и размеров.

Метод построения 3D-модели ригидных объектов с помощью пространственных сеток

Общая схема метода. Общая схема исполнения метода интерактивного построения 3D-модели ригидного объекта по данным одного изображения и при отсутствии атрибутивных данных об изображениях приведена на рис. 1.

На входе ригидный объект T , заданный изображением, которое описывает его некоторого ракурса. На изображении вся поверхностная область объекта делится на видимую (обозреваемую на изображении) и невидимую части. Поэтому восстанавливается 3D-модель только видимой части.

В цикле I происходит перебор областей изображения объекта, которые описываются простыми геометрическими фигурами (квадрат, окружность, треугольник и т.д.) или телами (куб, шар, конус и т.д.). В результате формируется 3D-модель каждой области, каждой из них соответствует составляющий ригидный объект (подобласть в составе объекта T) и сетка, задаваемая по опорным точкам. Структура задания опорных точек определяет тип, а их координаты размеры сетки. По заданным опорным точкам формируется модель сетки.

В цикле II происходит перебор элементов составляющего объекта, в результате чего элемент устанавливается на сетке (устанавливаются его форма, пространственное положение, цвет и другие параметры). Т.е. проводятся построения элементов объекта на самой сетке. Сначала на сетке строится контур объекта по точкам, линиям, полигонам и полиэдрам (разметка объекта). Для элементов не в узлах или линиях сетки могут потребоваться дополнительные геометрические построения. При этом для удобства разметки над сеткой проводятся геометрические преобразования. Затем построенным элементам присваиваются те или иные значения яркости, заданные в одном или более каналах (закраска объекта).

Невидимая часть объекта может быть восстановлена по другим изображениям, для которых выполняются те же процедуры. При необходимости в интерактивном режиме проводятся геометрические преобразования сетки. В том числе пространственные преобразования частей объекта, которые пространственно определены заданием их пространственной привязки по дополнительным опорным точкам на изображении.

Координатные сетки. Введём необходимые в дальнейшем системы координат.

Система координат изображения wxy двумерная декартова, в которой начало координат w установлено в левом верхнем углу изображения, ось x направлена в порядке возрастания номеров столбцов, y строк растра. Единицей расстояния в этой системе служит пиксель. Координаты в этой СК далее обозначаются строчными буквами: (x, y) .

Пространственная система координат $Ox_1x_2x_3$ трёхмерная декартова. В этой системе задаются ригидные объекты. Единицей расстояния в этой системе является метр. Координаты в этой СК далее обозначаются прописными буквами: (X, Y, Z) .

Также зададим вспомогательную узловую систему координат $0_{n_1} \dots n_p, i=1..t, t>1, 0$ – начало координат, n_i – координатные оси, t – размерность. Координаты точек в этой СК будем называть узловыми координатами и обозначать $\vec{n} = (n_1, \dots, n_t)$. Точки координатной сетки могут описываться как линейными, так и угловыми координатами, они заданы также в пространственной системе координат и имеют проекции в системе координат изображения.

Таким образом, в узловой СК задаётся координатная сетка S . Сетка задаётся параметрами $\zeta = \{N_i, n_{\min}(i), n_{\max}(i)\}$, где N_i – плотность, $n_{\min}(i)$ и $n_{\max}(i)$ – минимальные и максимальные узловые координаты сетки по i -й оси. При этом шаг h_i и размер m_i сетки по i -й оси:

$$h_i = m_i / N_i, m_i = n_{\max(i)} - n_{\min(i)},$$



Рис. 1. Схема исполнения метода

На сетке можно задать узлы, рёбра, грани и полиэдры. Узлом может быть точка P , имеющая те или иные координаты h . Ребро – отрезок, соединяющий два узла. Грань – замкнутая область, ограниченная полигоном, состоящим из рёбер. Полиэдр – замкнутая область, ограниченная множеством полигонов.

Типы координатных сеток. Координатные сетки различаются по типу и форме.

Тип сетки зависит от способа проецирования, которым получено обрабатываемое изображение. На изображении, полученном ортогональным проецированием, строится ортотрансформированная сетка S , имеющая постоянное пространственное разрешение. На изображении, полученном центральным проецированием от фокальной точки, строится перспективная сетка S' с переменным пространственным разрешением. Две эти сетки могут быть переведены друг в друга преобразованием, описанным ниже.

Базовая форма сетки прямоугольная. Она строится в декартовой СК, число осей $t=3$, оси взаимно ортогональны. Аффинная сетка строится в аффинной СК, число осей $t=3$, но оси не ортогональны. Посредством геометрических преобразований сетки других форм могут быть приведены к прямоугольной для удобства расчётов.

Сетки могут быть линейными и нелинейными. Нелинейные сетки задаются линейными и угловыми координатами и им соответствуют нелинейные геометрические фигуры, в частности, коническая, цилиндрическая, эллиптическая сетки (рис. 2).

Коническая сетка имеет форму конуса (рис. 2,а): O – центр эллипса в основании, Π – плоскость основания, B – вершина, OB – ось конуса. Координаты точки P : n_1 – расстояние от точки P до OB , n_2 – угловое расстояние точки на плоскости, параллельной Π , n_3 – высота точки.

Цилиндрическая сетка имеет форму цилиндра (рис. 2,б): a и b полуоси эллипсов в основаниях Π , O и B центры нижнего и верхнего оснований. Цилиндрическая сетка имеет те же координаты n_1, n_2, n_3 , что и коническая.

Эллиптическая сетка имеет форму эллипсоида (рис. 2,в): a, b, c – полуоси, O – центр эллипсоида, Π –

плоскость экватора. Координаты сетки: n_1 – нормированное расстояние от точки P до O , n_2 – угловое расстояние точки в плоскости Π , n_3 – в плоскости, перпендикулярной Π .

Линейные сетки (пирамидальная, призматическая и др.) описываются линейными координатами или формируются из нелинейных сокращением плотности до малых значений. При малых значениях N_2 ($N_2 < 6$) пирамидальная сетка соответствует конической (N_2 -угольная пирамида), призматическая – цилиндрической (N_2 -угольная призма).

Классификации геометрических фигур и тел соответствует классификация сеток установкой определённых ограничений на параметры сетки. Например, прямой конус бывает круговым ($a=b$), усечённым ($n_{\min}(3) \geq 0, n_{\max}(3) < N3$), двухполосным ($n_{\min}(3) < 0, n_{\max}(3) > 0$).

Сетки могут быть прямыми и наклонными. Прямым соответствуют прямые геометрические фигуры и тела, наклонным – наклонные, например прямой или наклонный цилиндр, прямой или наклонный конус.

Сетка с одними и теми же параметрами может иметь разную «кристаллическую» структуру в зависимости от выбора координат. Например, для конической сетки помимо n_1, n_2, n_3 могут быть введены координаты n_4 – угол между OB и PB , n_5 – угол между OB и OP . Сетка может быть построена по любым трём координатам, остальные выражаются через них.

Геометрические преобразования узловых координат координатных сеток. Опишем основные геометрические преобразования узловых координат координатных сеток.

С помощью геометрических преобразований $\chi: \bar{n} \rightarrow \bar{n}'$ сетка S с узловыми координатами \bar{n} , заданная параметрами ζ , может быть преобразована в сетку S' с узловыми координатами \bar{n}' , заданную параметрами ζ' .

Частные случаи геометрических преобразований сетки: движение, симметрирование и изменение формы сетки; преобразование сетки из ортотрансформированной в перспективную и наоборот; изменение ракурса сетки и изображения объекта, к которому она привязана.

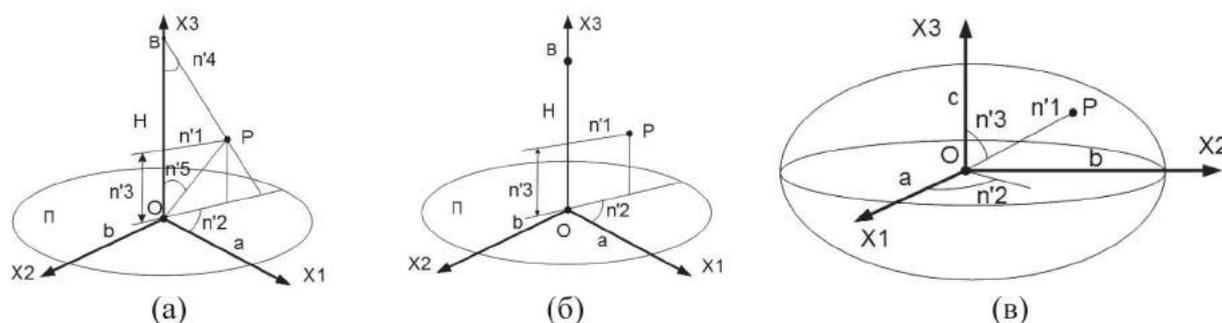


Рис. 2. Системы отсчёта сеток: а) коническая; б) цилиндрическая; в) эллиптическая

Рассмотрим преобразования движения (I), симметрирования (II) и изменения формы сетки (III).

I. Посредством преобразований движения выполняется движение сетки относительно изображения или изображения относительно сетки. Движение описывается аффинным преобразованием $\bar{n}' = F\bar{n} + G$, где F и G – некоторые матрицы-константы.

Простейшее преобразование тождественное, переводящее сетку в саму себя: F – единичная матрица, G – нулевая матрица (движения не происходит). Основные типы движений: сдвиг, поворот, растяжение. Преобразования координат для данных типов движений [24]:

$$\begin{aligned} \bar{n}' &= F_{31}\bar{n}, \bar{n}' = F_{32}(\bar{n} - \bar{n}_0^T) + \bar{n}_c^T, \\ \bar{n}' &= F_{33}(\bar{n} - \bar{n}_0^T), F_3 = F_{33}F_{32}F_{31}, \end{aligned}$$

где F_1 – оператор сдвига, F_2 – растяжения, F_3 – поворота.

$$F_1 = \begin{pmatrix} \Delta n_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta n_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta n_3 \end{pmatrix}, F_2 = \begin{pmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{pmatrix},$$

$$F_{31} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{pmatrix},$$

$$F_{32} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_2 & 0 & \sin \alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_2 & 0 & \cos \alpha_2 \end{pmatrix}, F_{33} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Здесь $\Delta \bar{n} = [\Delta n_1 \ \Delta n_2 \ \Delta n_3]$ и $\bar{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]$ – векторы сдвига и растяжения, Δn_i и q_i – сдвиг и растяжение по i -й оси. $\bar{n}_c = [n_{c1} \ n_{c2} \ n_{c3}]$ и $\bar{n}_0 = [n_{01} \ n_{02} \ n_{03}]$ – центры растяжения и поворота в пространстве, n_{ci} и n_{oi} – координаты точек по i -й оси. $\bar{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]$ – вектор поворота, α_i – поворот вокруг i -й оси. F_{3i} – матрица поворота вокруг i -й оси на угол α_i , F_3 – матрица поворотов в последовательности: вокруг первой, второй и третьей оси.

II. Посредством преобразований симметрирования выполняется привязка «копий» сетки на изображения однотипных объектов. Симметрирование также относится к аффинным преобразованиям. В частности, симметрия по прямым «зеркалам» [24]: по точке (центральная симметрия), по прямой (осевая симметрия), по плоскости (зеркальная симметрия).

$$F = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad G_i = 2 \begin{bmatrix} l_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & l_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & l_{i3} \end{bmatrix}.$$

$i=1$ – центральная, $i=2$ – осевая, $i=3$ – зеркальная симметрия.

$$l_{11} = c_1, \quad l_{12} = c_2, \quad l_{13} = c_3,$$

$$l_{21} = \frac{n_1 m_1^2 + k_1 m_2^2 + k_1 m_3^2 - m_1(m_2(k_2 - n_2) + m_3(k_3 - n_3))}{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2},$$

$$l_{22} = \frac{m_2(l_{21} - k_1)}{m_1} + k_2, \quad l_{23} = \frac{m_3(l_{21} - k_1)}{m_1} + k_3,$$

$$l_{31} = \frac{-q_1 t_1^2 + n_1 t_2^2 + n_1 t_3^2 - t_1(t_2(q_2 - n_2) + t_3(q_3 - n_3))}{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2}.$$

Центр симметрии задан точкой $\bar{c} = [c_1 \ c_2 \ c_3]$. Ось симметрии задана коллинеарным вектором $\bar{m} = [m_1 \ m_2 \ m_3]$ и точкой $\bar{k} = [k_1 \ k_2 \ k_3]$. Плоскость симметрии задана нормальным вектором $\bar{t} = [t_1 \ t_2 \ t_3]$ и точкой $\bar{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]$.

III. Посредством преобразований формы находятся узловые координаты сетки одной формы по узловым координатам сетки другой формы. Для преобразований в прямоугольную сетку S сетки S' другой формы сначала рассчитывается сетка координат:

$$n'_1 = h'_i(n'_{\min(i)} \dots n'_{\max(i)}), \quad h'_i = m'_i / N'_i,$$

где m'_i – размеры, N'_i – плотность, $n'_{\min(i)}$ и $n'_{\max(i)}$ – минимальные и максимальные значения узловых координат сетки S' по i -й оси. Величины m'_i , N'_i , $n'_{\min(i)}$, $n'_{\max(i)}$ задаются.

Затем по найденным координатам по обратному преобразованию χ^{-1} узловые координаты сетки S' преобразуются в узловые координаты сетки S : $\bar{n}' \rightarrow \bar{n}$.

Примеры преобразований сетки другой формы в прямоугольную сетку:

- цилиндрической: $n_1 = an'_1 \cos n'_2$, $n_2 = bn'_1 \sin n'_2$, $n_3 = n'_3$;
- эллиптической: $n_1 = an'_1 \cos n'_2 \sin n'_3$, $n_2 = bn'_1 \sin n'_2 \sin n'_3$, $n_3 = cn'_1 \cos n'_3$.

Более сложные преобразования получаются цепочкой преобразований χ . В частности, для преобразований прямой сетки в наклонную цепочка имеет два звена: из прямоугольной сетки в аффинную, из аффинной в сетку заданной формы.

Порядок построения модели. Опишем порядок построения трёхмерной модели.

Выбор объекта и его формы на изображении. Выбор объекта и его формы на изображении проводится экспертом, исходя из визуального распознавания типа геометрической фигуры, которую напоминает данный объект.

Разметка опорных точек на изображении. Выбор опорных точек рассмотрим на примере прямоугольной сетки, которая построена на ортотрансформированном изображении [25].

Прямоугольная сетка строится по четырем опорным точкам на изображении o, a_1, a_2, a_3 . На рис. 3 показано изображение объекта и выбор опорных точек на нём. Объект «здание стандартной прямоугольной формы» (строение в составе хозяйственной зоны полигона твёрдых бытовых отходов Кучино Московского

региона). Точка o на нём выбрана на углу здания, а точки a_1, a_2 и a_3 – на его ортогональных рёбрах.

Расчёт геометрических размеров сетки. Можно задать пространственную СК так, чтобы её орты $OX_i, i = 1, 2, 3$ проецировались в направления, задаваемые векторами a_i (см. рис. 4).

При этом прообразами опорных точек $a_i, i = 1, 2, 3$ будут точки A_i , лежащие на осях пространственной системы координат. Без ограничения общности можно считать, что плоскость изображения π_{xy} проходит через одну из этих точек, пусть это будет A_3 , далее обозначаемая без индекса как A . Точки B и C являются пересечениями плоскости π_{xy} с осями OX_1 и OX_2 . Обозначим координаты опорных точек в СК изображения: $o=(x_0, y_0), a_1=(x_1, y_1), a_2=(x_2, y_2), a_3=(x_3, y_3)$. Координаты этих четырех точек

$$\Omega = \{x_i, y_i\}_{i=0}^3 \quad (1)$$

являются исходными данными для расчёта геометрических размеров сетки.

В пространственной системе координат обозначим координаты точек: $o(X_0, Y_0, Z_0), A(X_A, Y_A, Z_A), B(X_B, Y_B, Z_B), C(X_C, Y_C, Z_C)$, при этом (см. рис. 5) $X_A=Y_A=Y_B=Z_B=X_C=Z_C=0$. Из треугольников I по теореме Пифагора:

$$X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2 = X_B X_0 = Y_C Y_0 = Z_A Z_0. \quad (2)$$

Из треугольников II в СК π_{xy} углы α, β, γ соответственно между векторами \bar{a}_2 и \bar{a}_3 , \bar{a}_3 и \bar{a}_1 , \bar{a}_1 и \bar{a}_2 найдём через скалярное произведение:

$$\begin{aligned} C_\alpha = \cos \alpha &= \frac{\bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3}{|\bar{a}_2| \cdot |\bar{a}_3|}, \\ C_\beta = \frac{\bar{a}_3 \cdot \bar{a}_1}{|\bar{a}_3| \cdot |\bar{a}_1|}, C_\gamma = \cos \gamma &= \frac{\bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2}{|\bar{a}_1| \cdot |\bar{a}_2|}. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{a}_1 &= (x_1 - x_0, y_1 - y_0), \bar{a}_2 = (x_2 - x_0, y_2 - y_0), \\ \bar{a}_3 &= (x_3 - x_0, y_3 - y_0). \end{aligned} \quad (4)$$

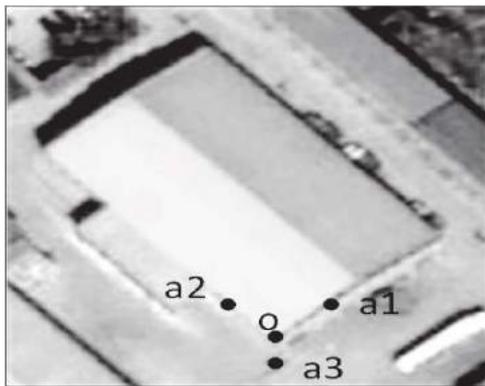


Рис. 3. Пример выделения опорных точек на изображении

Из треугольников III в пространственной СК углы α, β, γ соответственно между векторами \bar{c} и \bar{a}, \bar{a} и \bar{b}, \bar{b} и $\bar{c} (\bar{a} = \overline{OA}, \bar{b} = \overline{OB}, \bar{c} = \overline{OC})$ через скалярное произведение:

$$\begin{aligned} C_\alpha = \cos \alpha &= \frac{\bar{a} \cdot \bar{c}}{|\bar{a}| \cdot |\bar{c}|}, \\ C_\beta = \cos \beta &= \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{|\bar{a}| \cdot |\bar{b}|}, C_\gamma = \cos \gamma = \frac{\bar{b} \cdot \bar{c}}{|\bar{b}| \cdot |\bar{c}|}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{a} &= (X_A - X_0, Y_A - Y_0, Z_A - Z_0), \\ \bar{b} &= (X_B - X_0, Y_B - Y_0, Z_B - Z_0), \\ \bar{c} &= (X_C - X_0, Y_C - Y_0, Z_C - Z_0). \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда из (5–6) получим после преобразований с учётом (2):

$$\begin{aligned} C_\alpha &= \frac{-Z_A Z_0}{\sqrt{Z_A^2 - Z_A Z_0} \cdot \sqrt{Y_C^2 - Y_C Y_0}}, \\ C_\beta &= \frac{-Z_A Z_0}{\sqrt{Z_A^2 - Z_A Z_0} \cdot \sqrt{X_B^2 - X_B X_0}}, \\ C_\gamma &= \frac{-Z_A Z_0}{\sqrt{X_B^2 - X_B X_0} \cdot \sqrt{Y_C^2 - Y_C Y_0}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) также с учётом (2):

$$\begin{aligned} C_\alpha &= \left(1 - \frac{X_B}{X_0}\right) C_\beta C_\gamma, C_\beta = \left(1 - \frac{Y_C}{Y_0}\right) C_\alpha C_\gamma, \\ C_\gamma &= \left(1 - \frac{Z_A}{Z_0}\right) C_\alpha C_\beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Из треугольников I в пространственной СК (см. рис. 5 по свойствам синусов с учётом (2)):

$$X_0 = X_B \sin^2 \xi, Y_0 = Y_C \sin^2 \psi, Z_0 = Z_A \sin^2 \zeta. \quad (9)$$

Из (8) и (9):

$$\begin{aligned} \sin \xi &= \left(1 - \frac{C_\alpha}{C_\beta C_\gamma}\right)^{-2}, \sin \psi = \left(1 - \frac{C_\beta}{C_\alpha C_\gamma}\right)^{-2}, \\ \sin \zeta &= \left(1 - \frac{C_\gamma}{C_\alpha C_\beta}\right)^{-2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для треугольников I соответственно по свойствам косинусов:

$$\begin{aligned} m_1 = \frac{OB}{oB} &= \frac{1}{\cos \xi}, m_2 = \frac{OC}{oC} = \frac{1}{\cos \psi}, \\ m_3 &= \frac{OA}{oA} = \frac{1}{\cos \zeta}. \end{aligned} \quad (11)$$

$$l_1 = r \cdot m_1, l_2 = r \cdot m_2, l_3 = r \cdot m_3. \quad (12)$$

где r – пространственное разрешение изображения; m_i и l_i – масштабирующие и осевые коэффициенты на соответственных координатных осях, постоянные для данного ортотрансформированного изображения. Они дают пересчёт длины отрезка, измеренного вдоль координатной оси, из СК изображения в пространственную. Масштабирующие коэффициенты дают пересчёт в пикселях, осевые – в физических единицах.

Из (10) и (12):

$$l_1 = r \left(1 - \left(1 - \frac{C_\alpha}{C_\beta C_\gamma} \right)^{-4} \right)^{-0.5}, l_2 = r \left(1 - \left(1 - \frac{C_\beta}{C_\alpha C_\gamma} \right)^{-4} \right)^{-0.5},$$

$$l_3 = r \left(1 - \left(1 - \frac{C_\gamma}{C_\alpha C_\beta} \right)^{-4} \right)^{-0.5}, \quad (13)$$

аналогичные выражения для l_2 и l_3 .

Таким образом, для расчёта осевых коэффициентов прямоугольной сетки сначала для опорных точек (1) по (3–4) находим $C_\alpha, C_\beta, C_\gamma$, а затем по (13) величины осевых коэффициентов. Тогда пространственные координаты точки с координатами Ω на изображении:

$$X_i = l_i \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Если оси декартовой СК не заданы явно, то их можно найти геометрическими построениями, а затем отметить на них опорные точки (см. рис. 6). В данном случае координатная сетка (в форме усечённого конуса) идентифицируется по опорным точкам $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$. Структура опорных точек своя для каждого типа сетки.

Привязка сетки к изображению объекта. Рассмотрим зависимость между узловыми координатами и координатами изображения на примере прямоугольных сеток: ортотрансформированной и перспективной.

На рис. 7,а показана геометрическая схема для ортотрансформированной сетки. Прямые k_1 и k_6 параллельны оси OX_1, k_2 и $k_4 - OX_2, k_3$ и $k_5 - OX_3$. Точка P имеет узловые координаты $\bar{n} = (n_1, n_2, n_3)$ и координаты на изображении $\bar{p} = (x, y)$.

$$\bar{p} = M\bar{n} + \bar{p}_0, \bar{p}_0 = (x_0, y_0)^T, M = \begin{pmatrix} d_{x1} & d_{x2} & d_{x3} \\ d_{y1} & d_{y2} & d_{y3} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$d_{xi} = \frac{\Delta x_i}{N_i}, d_{yi} = \frac{\Delta y_i}{N_i}, \Delta x_i = x_i - x_0, \Delta y_i = y_i - y_0.$$

На рис. 7,б показана геометрическая схема для перспективной сетки. Точка фокуса $f_i, i=1,2,3$ определяется расстоянием R_i по i -й оси от начала координат. На перспективных изображениях точки f_i – точки пересечения линий k_1 и $OX_1 (f_1), k_2$ и $OX_2 (f_2), k_3$ и $OX_3 (f_3)$, параллельных в СК $OX_1 X_2 X_3$ и лежащих в ортогональных плоскостях, но пересекающихся в СК $иху$. В этом случае R_i можно найти разметкой линий k_1, k_2, k_3 на изображении, нахождения точек f_i и расстояния до них от точки o в СК $иху$. С другой стороны, R_i найдется решением уравнений

$$\Delta x'_i \ln \left(1 - \frac{\Delta r_i}{R_i} \right) = \Delta x_i \ln \left(1 - \frac{\Delta r'_i}{R_i} \right),$$

$$\Delta r_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}, \Delta r'_i = \sqrt{\Delta x_i'^2 + \Delta y_i'^2}, \Delta x'_i = x'_i - x_0,$$

$$\Delta y'_i = y'_i - y_0, i = 1, 2, 3,$$

где (x'_i, y'_i) – координаты опорных точек a'_i в СК $иху$, размечаемых на изображении на осях $OX_i, \Delta r_i$ и $\Delta r'_i$ – расстояния от точки o до точек a_i и a'_i в СК изображения, Δx_i и Δy_i – проекции отрезка Δr_i на оси $их$ и $иу$, $\Delta x'_i$ и $\Delta y'_i$ – проекции отрезка $\Delta r'_i$ на оси $их$ и $иу$.

Преобразования узловых координат \bar{n} ортотрансформированной сетки в узловые координаты \bar{n}' перспективной сетки точки

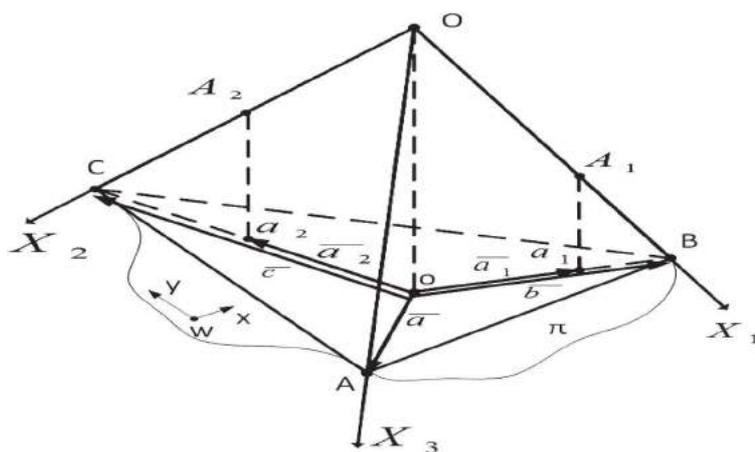


Рис. 4. Пространственная система координат и её проекция

$$n'_i = 1 - q_i^{n_i}, q_i = \sqrt[n_i]{1 - \frac{\Delta r_i}{R_i}}, \quad (16)$$

где q_i – знаменатель геометрической прогрессии, задающий уменьшение масштаба с расстоянием на i -й оси. Координаты точки f_i в СК изображения

$$x_{f_i} = x_0 + R_i \frac{\Delta x_i}{\Delta r_i}, y_{f_i} = y_0 + R_i \frac{\Delta y_i}{\Delta r_i}.$$

Преобразования координат перспективной сетки из узловых \bar{n} в координаты изображения \bar{p} :

$$\begin{aligned} \bar{p}' &= \begin{bmatrix} x'_P \\ y'_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_D - y_{f3} & x_{f3} - x_D \\ y_{f1} - y_E & x_E - x_{f1} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{f3}y_D - x_Dy_{f3} \\ x_Ey_{f1} - x_{f1}y_E \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{y}_1 - y_{f2} & x_{f2} - \hat{x}_1 \\ y_{f1} - \hat{y}_2 & \hat{x}_2 - x_{f1} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{f2}\hat{y}_1 - \hat{x}_1y_{f2} \\ \hat{x}_2y_{f1} - x_{f1}\hat{y}_2 \end{bmatrix}, \quad (17) \\ \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{y}_3 - y_{f2} & x_{f2} - \hat{x}_3 \\ y_{f3} - \hat{y}_2 & \hat{x}_2 - x_{f3} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{f2}\hat{y}_3 - \hat{x}_3y_{f2} \\ \hat{x}_2y_{f3} - x_{f3}\hat{y}_2 \end{bmatrix}, \\ \hat{x}_i &= x_0 + (x_{f_i} - x_0) \cdot n'_i, \quad \hat{y}_i = y_0 + (y_{f_i} - y_0) \cdot n'_i. \end{aligned}$$

На рис. 8 приведены модели прямоугольной сетки при постоянном (а) и переменном (б) пространственном разрешении. Вторая получена из первой преобразованием (16). Координаты опорных точек $\Omega = \{0, 0, 10, 10, -20, -5, 20, 0\}$, $N_1=N_2=N_3=3$. Расстояния до фокусов: $R_1=1000, R_2=-1000, R_3=100$.

На рис. 9 показаны примеры преобразований для сетки на рис. 8, а: 1) сдвиг – $\Delta \bar{n} = [1 \ 2 \ 3]$ (рис. 9,а);

2) поворот – $\bar{\alpha} = [1 \ 2 \ 3]$, $\bar{n}_0 = [1 \ 1 \ 1]$ (рис. 9,б); 3) растяжение – $\bar{q} = [3 \ 2 \ 1]$, $\bar{n}_c = [2 \ 2 \ 2]$ (рис. 9,б). На рисунках обозначены опорные точки o, a_1, a_2, a_3 исходной сетки.

На рис. 10 приведены примеры нелинейных сеток: 1) коническая – $m_1=1, m_2=2\pi, m_3=10, N_1=2, N_2=20, N_3=3, a=b=10$; 2) цилиндрическая – $m_1=1, m_2=2\pi, m_3=10, N_1=2, N_2=20, N_3=2, a=b=10$; 3) эллиптическая (сферическая) – $m_1=1, m_2=m_3=2\pi, N_1=1, N_2=20, N_3=20, a=b=c=10$. Исходная сетка – прямоугольная (см. рис. 8, а).

На рис. 11 – примеры линейных сеток: 1) пирамидальная (из соответствующей конической сетки) – $N_1=2, N_2=3, N_3=3$; 2) призматическая (из соответствующей цилиндрической сетки) – $N_1=2, N_2=3, N_3=2$.

Построение элементов объекта на сетке. При построении элементов объекта на сетке, привязанной к изображению, проводится: привязка интерактивно выбранной точки к ребру сетки (I); преобразование узловых координат выбранных элементов в линейные (II). В результате формируется контур объекта, задаваемый множеством всех установленных элементов (III). В процессе разметки (закраски) объекта выполняются геометрические преобразования координатной сетки и привязанного к ней изображения для удобства построения модели.

I. Привязка интерактивно выбранной точки к ребру сетки.

Построения 3D-модели на сетке (по её узлам, рёбрам и граням) выполняются по преобразованию $\bar{p} \rightarrow \bar{n}$.

Для интерактивно выбранной на изображении точки P с координатами $\bar{p} = (x, y)$ в СК ixu находится ближайшее ребро P_1P_2 , где P_1 и P_2 – соседние узлы сетки:

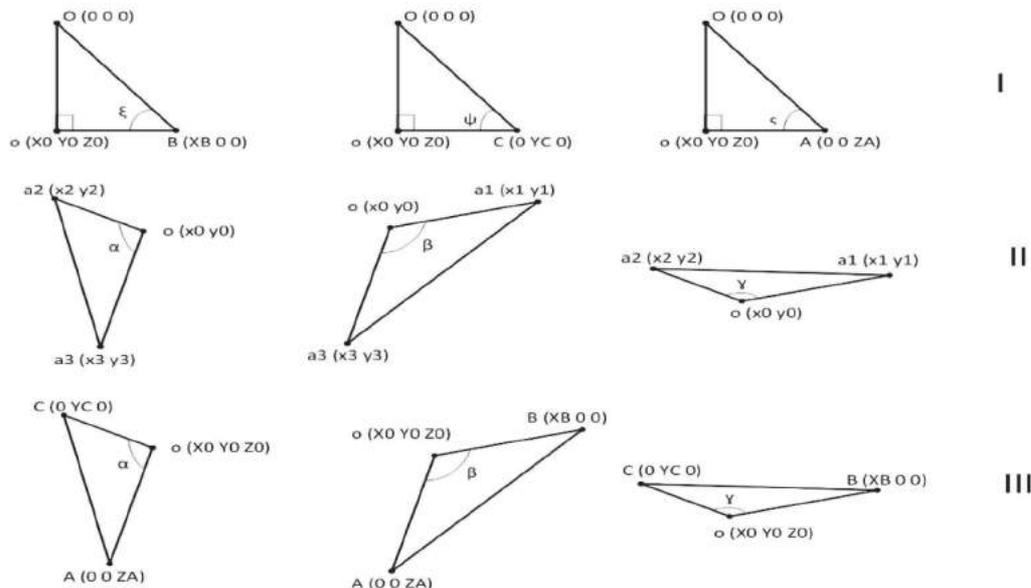


Рис. 5. Треугольники в системах координат

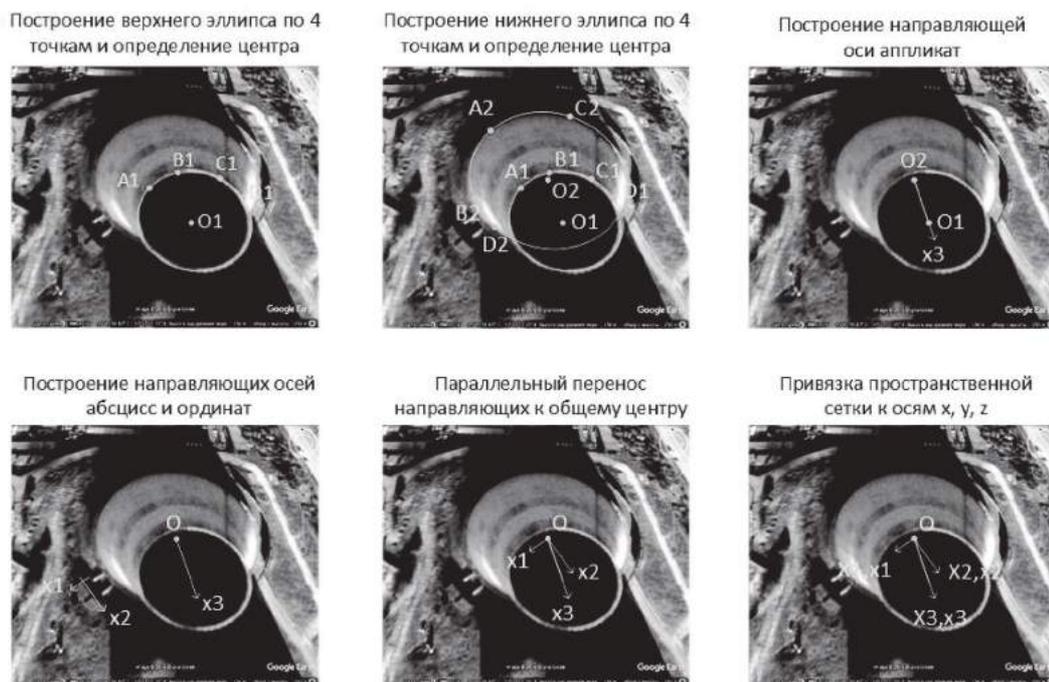


Рис. 6. Геометрические построения для получения образа пространственной декартовой системы координат (на примере тепловых башен)

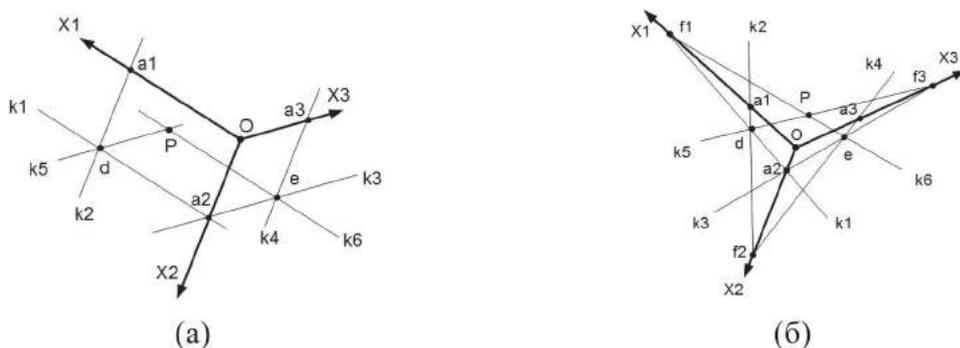


Рис. 7. Прямоугольная сетка: а) ортотрансформированная; б) перспективная (геометрические построения для расчета координат точки P)

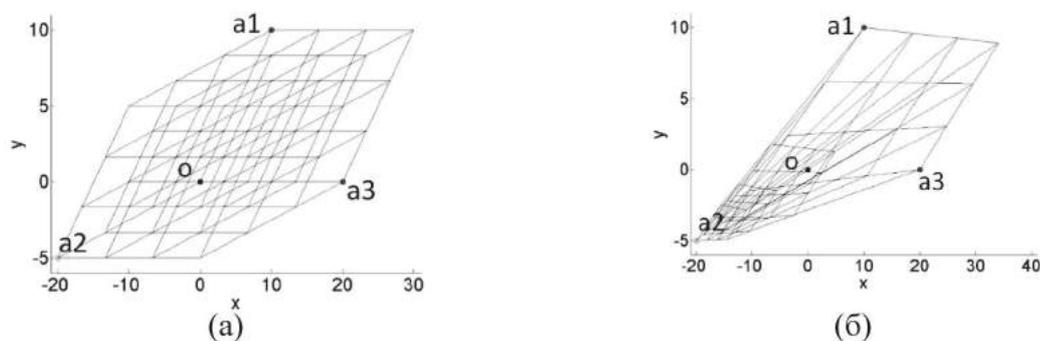


Рис. 8. Прямоугольная сетка: а) ортотрансформированная; б) перспективная (программные модели)

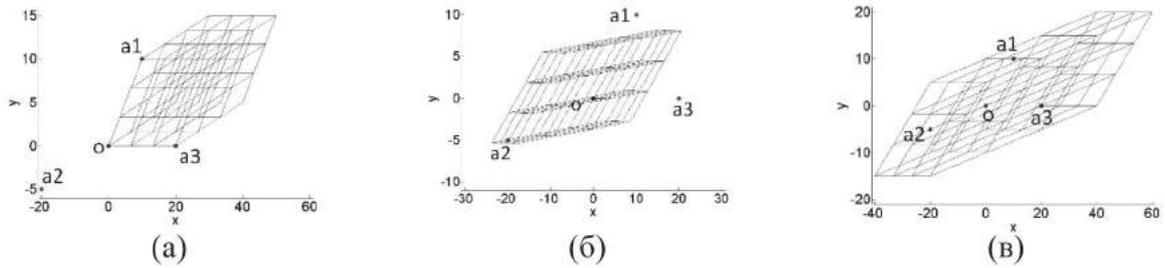


Рис. 9. Примеры преобразований движения координатной сетки: а) сдвиг; б) поворот; в) растяжение (программные модели)

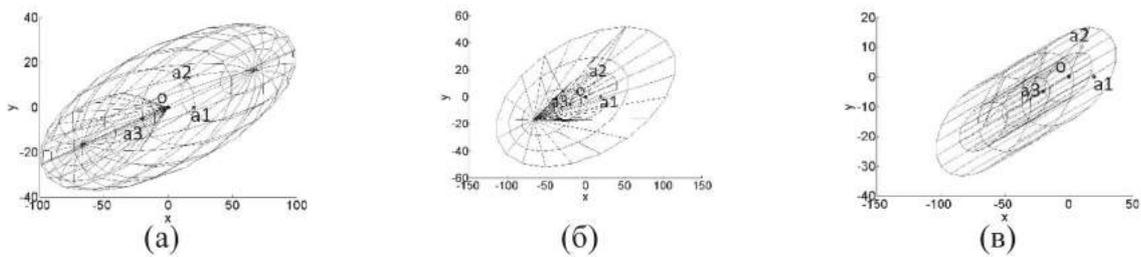


Рис. 10. Примеры нелинейных сеток: а) коническая; б) цилиндрическая; в) эллиптическая (программные модели)

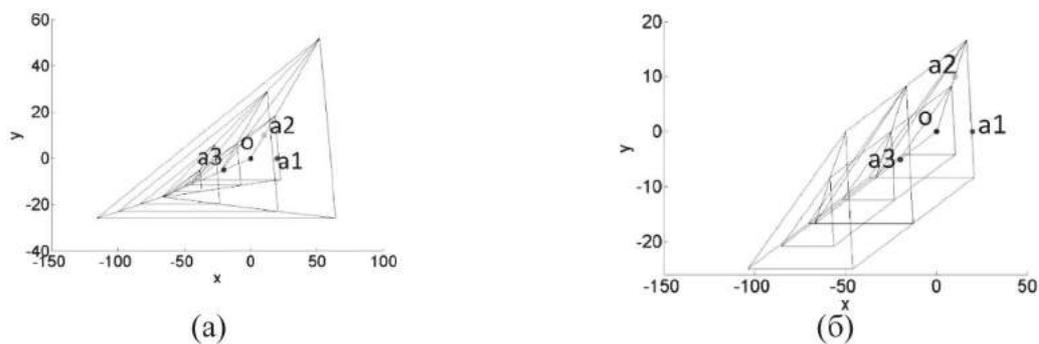


Рис. 11. Примеры линейных сеток: а) пирамидальная; б) призматическая

$$\rho(\bar{n}) = \frac{(kx + ly + m)^2}{k^2 + l^2} \rightarrow \min. \quad (18)$$

$\rho(\bar{n})$ – расстояние от точки P до прямой P_1P_2 , заданной уравнением $kx + ly + m = 0$ в СК ixy . $k = y_1 - y_2$, $l = x_2 - x_1$, $m = x_1y_2 - x_2y_1$, $\bar{p}_1 = [x_1 \ y_1]^T = M\bar{n} + \bar{p}_0$, $\bar{p}_2 = [x_2 \ y_2]^T = M(\bar{n} + \Delta\bar{n}) + \bar{p}_0$, $\bar{n} = [n_1 \ n_2 \ n_3]^T$, $\Delta\bar{n} = [\Delta n_1 \ \Delta n_2 \ \Delta n_3]^T$, $|\Delta\bar{n}| = 1$. \bar{p}_1 и \bar{p}_2 – координаты точек P_1 и P_2 в СК ixy , \bar{n} и $\bar{n} + \Delta\bar{n}$ – в СК $OXYZ$ соответственно. Рёбра P_1P_2 параллельны одной из осей, т.е. либо $\Delta n_1 = 1$, либо $\Delta n_2 = 1$, либо $\Delta n_3 = 1$. Для каждого из трёх $\Delta\bar{n}$ находим точку экстремума функции $\rho(\bar{n})$ (см. (18)). Т.е. для каждого ортогонального направления $\Delta\bar{n}$ получаем своё «оптимальное» ребро P_1P_2 (всего – три). Каждому из них соответствует своё минимальное ρ по формуле (18), минимальному из этих трёх ρ – искомое ребро P_1P_2 .

Координаты проекции $\bar{p}' = (x, y)$ точки P на это ребро:

$$\bar{p}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l & k \\ k & l \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} ky - lx \\ -m \end{bmatrix}, \quad (19)$$

II. Преобразование узловых координат в линейные.

Пересчёт координат точки P , установленной на прямоугольной сетке, из узловых в линейные выполняется согласно (14–15):

$$X_i = n_i h_i l_i, \quad h_i = \sqrt{d_{xi}^2 + d_{yi}^2}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (20)$$

где l_i – осевые коэффициенты по i -й оси, h_i – шаг сетки на i -й оси в пикселях (см. (15)).

Заметим, что преобразование (20) выполняется как для ортотрансформированной, так и для перспективной сетки. В обоих случаях h_i и l_i являются постоянными для выбранных опорных точек. В перспективной сетке вместо n_i используется n'_i по формуле (16). Тогда расстояние L в пространстве между любыми двумя точками P_1 и P_2 :

$$L = P_1P_2 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}, \quad L_i = \Delta n_i h_i l_i, \quad \Delta n_i = |n_{2i} - n_{1i}|. \quad (20)$$

$$P_j : (X_{j1}, X_{j2}, X_{j3}), (n_{j1}, n_{j2}, n_{j3}).$$

III. Построение контура объекта на сетке.

При разметке точек объекта на сетке формируется матрица координат точек:

$$v = (v_1 \dots v_s), \quad v_j = (X_{j1} X_{j2} X_{j3})^T,$$

где v_j – координаты j -й точки P_j в составе контура объекта, s – число точек в модели, X_{ij} – i -я координата j -й точки в СК $OX_1X_2X_3$. В этой СК координаты v_j постоянны, но в СК ixy соответствующие координаты $\bar{p}_j = M\bar{n}_j + \bar{p}_0$ меняются в зависимости от изображений объекта, которым соответствуют разные образы сетки. Образ сетки задаётся: точкой \bar{p}_0 (сдвиг), осевыми коэффициентами l_i (поворот), шагами h_i (масштаб). Разметка точек

выполняется на разных образах, которым соответствуют различные видимые части объекта на изображениях.

При разметке линий объекта формируется матрица координат линий:

$$u = (u_1 \dots u_e), \quad u_j = (j_1 j_2)^T,$$

где u_k – координаты k -го отрезка $L_k = P_{k1}P_{k2}$ в составе контура объекта, e – число линий в модели.

Закраска элементов объекта. Закраска элементов объекта задаётся значениями яркостей, присваиваемых областям полигонов в составе контура.

Объект описывается множеством полигонов $V = \{V_i\}$. Каждый полигон U можно представить рядом точек $\{P_j\}$ в СК $OX_1X_2X_3$. Для конкретного образа в СК ixy координаты соответственно $\{p_j\}$. Закраска полигона в заданную текстуру T присвоение всем пикселям p , лежащим внутри полигона, цвета C текстуры, заданного законом распределения $C = f(e_1, e_2)$, где $e_1, e_2 \in [0, 1]$ – приведённые значения параметров распределения. Множество всех таких пикселей p находится по известному алгоритму «точка в полигоне» [19].

Частный случай: $C = const$ на каждом канале изображения (например, среднее значение по области U). Тогда при закраске каждому полигону U в составе V соответствует свой цвет C . Для разных образов сетки имеем разные образы полигонов. Невидимая часть объекта закрашивается в характерный цвет.

«Естественную» модель закраски можно получить, присвоив сторонам объекта (полигонам) соответствующие яркости на изображении. Т.к. полигон при этом задан в пространстве, данные цвета определены для любого образа объекта для любых ракурсов.

Пусть объект состоит из простейших полигонов $U = P_1P_2P_3$ треугольников с вершинами P_1, P_2, P_3 , имеющих узловые координаты $\bar{n}_1, \bar{n}_2, \bar{n}_3$. Для некоторого образа сетки S данным точкам соответствуют точки $\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3$ на исходном изображении J . Над S выполняется геометрическое преобразование, переводящее его в новую сетку S' . Тогда над точками \bar{p} внутри полигона U изображения J выполняется преобразование, переводящее их в точки нового изображения J' :

$$\begin{aligned} \bar{p} &= M\bar{n} + \bar{p}_0, \bar{p}' = M'\bar{n} + \bar{p}'_0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{p}'(\bar{p}) &= K\bar{p} + Q, \bar{p}(\bar{p}') = K^{-1}(\bar{p}' - Q), \\ K &= (M'W)(MW)^{-1}, Q = K(M\bar{n}_0 + \bar{p}_0) + M'\bar{n}'_0 + \bar{p}'_0, \end{aligned}$$

Здесь M, \bar{p}_0 и M', \bar{p}'_0 – преобразования узловых координат в координаты изображений J и J' ; $\bar{n} = W\bar{t} + \bar{n}_0$ – уравнение плоскости полигона в СК $OX_1X_2X_3$, заданное параметрически: $W = (\bar{n}_2 - \bar{n}_1 \ \bar{n}_3 - \bar{n}_1)$, $\bar{t} = (t_1 \ t_2)^T$ – параметры. Преобразования подлежат точки \bar{p} , лежащие внутри полигона U (по алгоритму «точка в полигоне»). В процессе пространственных геометрических преобразований точки \bar{p} внутри каждого полигона преобразуются в точки \bar{p}' . Значениям яркости $C = J(p')$

пикселей p' нового образа присваиваются значения яркостей прежнего образа: $C=J(g)$, $g_x \in [1, s_x]$, $g_y \in [1, s_y]$; $C=0$, $g_x \notin [1, s_x]$, $g_y \notin [1, s_y]$. $g=(g_x, g_y)=[p(p)]$, $[]$ – извлечение целой части.

Обсуждение результатов

Данный метод применим: при построении 3D-моделей объектов, труднодоступных для контактных и дистанционных наблюдений; при работе с ограниченными данными (нет необходимости в наличии другой информации, кроме самого изображения): при работе с изображениями низкого качества (наличия дефектов или скрытых частей объекта). Метод является оперативным и «точечным», что позволяет его применить в военных целях и в области гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций [26–27].

К достоинствам метода относятся: малое количество необходимых исходных данных (достаточно одного изображения и нет необходимости в метаданных); работа с изображениями разных типов (космические или аэрофотоснимки, фотографии, картинки, микроскопические изображения и др.); простота использования (для построения 3D-модели достаточно разметить координатную сетку на объекте и выполнить на ней построения частей объекта).

Границы применимости метода: возможность ошибок построения 3D-модели, которые зависят от точности разметки точек и линий; строить 3D-модель можно только для объектов «правильной» формы, которые можно описать «правильными» геометрическими линиями (отрезками, дугами окружностей и эллипсов и др.), фигурами (квадрат, треугольник, окружность и т.д.) и телами (куб, пирамида, сфера и т.д.); оценка 3D-модели ограничена пространственным разрешением изображения; для того чтобы увидеть всю поверхность объекта, необходимо не менее двух его изображений, снятых с противоположных ракурсов.

Заключение

Разработан метод пространственных сеток, позволяющий построить 3D-модель ригидного объекта по одному изображению, в основе которого лежит привязка к изображению координатной сетки, точки которой определены в пространственной системе координат. Данный метод применим при низком качестве изображений. Исходными данными могут быть оптические изображения, как ортотрансформированные, так и перспективные. Причём чем лучше приближение к объекту, тем больше деталей можно увидеть и тем точнее может быть построена 3D-модель. Т.к. модель ригидного объекта строится интерактивно, её точность зависит от качества работы оператора и качества обработки изображения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58317X0061).

Литература

1. Мурынин, А. Б. Автоматическая система распознавания личности по стереоизображениям / А.Б. Мурынин // Изв. РАН. ТиСУ. – 1999. – № 1. – С. 106–114.
2. Матвеев, И. А. Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация алгоритмов восстановления поверхности / И.А. Матвеев, А.Б. Мурынин // Изв. РАН. ТиСУ. – 1998. – № 3. – С. 149–155.
3. Методы синтеза трехмерных моделей земной поверхности в инфракрасном диапазоне спектра / Г.Г. Себряков [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 10. – С. 12–20.
4. Мурынин, А. Б. Контроль качества пористых эластичных материалов методами технического зрения / А.Б. Мурынин, И.В. Сафонов, С.Ю. Яковлев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 11. – С. 13–18.
5. Выголов, О. В. Mobile Robot Stereovision System For Real-Time Obstacle Detection / О.В. Выголов, С.Ю. Желтов, Ю.В. Визильтер // Мехатроника, управление и информатика. – 2011. – № 6. – С. 202–215.
6. Визильтер, Ю. В. Использование проективных морфологий в задачах обнаружения и идентификации объектов на изображениях / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов // Изв. РАН. ТиСУ. – 2009. – № 2. – С. 125–138.
7. Желтов, С. Ю. Обнаружение препятствий на пути следования мобильного робота на основе метода радиального ортотрансформирования / С.Ю. Желтов, О.В. Выголов // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – № 5. – С. 146–158.
8. Мурынин, А. Б. Принципы построения системы стереоскопического зрения для управления движением робота / А.Б. Мурынин, И.А. Матвеев // Изв. РАН. ТиСУ. – 2003. – № 3. – С. 184–192.
9. Тужилкин, А. Ю. Модели и алгоритмы реконструкции трехмерных сцен на основе спутниковых изображений и априорной информации : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.17 / А.Ю. Тужилкин. – ФГБОУВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2016. – 141 с.
10. Суцеский, Д. В. Выявление и 3d визуализация искусственных объектов земной поверхности с использованием лидарных и оптических спутниковых изображений / Д.В. Суцеский // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 165–168.
11. Киричук, В. С. Двухпороговый алгоритм обнаружения точечных объектов по стереоизображениям / В.С. Киричук, А.К. Шакинов // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 55–60.
12. Методика построения 3D-моделей ригидных объектов по одному изображению и ее применение в построении 3D-моделей антропогенных территорий по космическим изображениям / М.Л. Казарян [и др.] // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: сборник научных трудов / М.Л. Казарян [и др.]. – М.: Инфра-М; Znanium.com, 2018. – С. 121–125.
13. Пространственное моделирование реальных сцен и освещенности в программе 3ds-max в проектной деятельности школьников / М.Л. Казарян [и др.] // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

сборник научных трудов / М.Л. Казарян [и др.]. – М.: Инфра-М; Znanium.com, 2018. – С. 110–114.

14. Попело, В. Д. Автоматизированная корреляционная процедура выбора соответственных точек на цифровых изображениях в стереопаре / В.Д. Попело, М.В. Ванеева // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). – 2015. – Т. 1. – С. 52–54.

15. Панин, С. В. Метод определения характеристических точек изображения в системах стереозрения / С.В. Панин, В.О. Чемезов, П.С. Любутин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 224–230.

16. Бобир, Н. Я. Фотограмметрия / Н.Я. Бобир, А.Н. Лобанов, Г.Д. Федорук. – М.: «Недра», 1974. – 472 с.

17. Shape-from-shading: a survey / R. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1999. – Vol. 8, No. 21. – P. 690 – 706.

18. Horn, B. K. P. Shape from shading / В.К.Р. Horn. – Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1989. – P. 123 – 171.

19. Лурье, И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник / И.К. Лурье. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.

20. Shufelt, J.A. Exploiting photogrammetric method for building extraction in aerial images / J.A. Shufelt // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1996. – Vol. 31, Part B6. – P. 74–79.

21. Extracting Buildings from Aerial Images using Hierarchical Aggregation in 2D and 3D / A. Ficher [et al.] // Computer vision and image understanding. – 1998. – Vol. 72, No. 2. – P. 185–203.

22. Dave, C. P. A survey on Geometry Correction of Satellite Imagery / С.Р. Dave, R. Joshi, S.S. Srivastava // International Journal of Computer Applications. – 2015. – Vol. 116, No. 12. – P. 24–27.

23. Haala, N. An update on automatic 3D building reconstruction / N. Haala, M. Kada // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2010. – Vol. 65, No. 6. – P. 570–580.

24. Канатников, А. Н. Аналитическая геометрия / А.Н. Канатников, А.П. Крищенко. – М.: «МГТУ им. Н. Э. Баумана», 2000. – 338 с.

25. Рихтер, А. А. Метод построения 3D-модели объектов поверхности земли по одному космическому изображению и его применение в задаче космического мониторинга объектов захоронения отходов / А.А. Рихтер, А.Б. Мурынин, В.Ю. Игнатьев // Материалы 14-й Всерос. отк. ежегод. конф.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных (ИКИ РАН-2016, 14–18 ноября). – М.: ИКИ РАН, 2016. – С.44.

26. Построение 3D-моделей ригидных объектов по косвенным изображениям методом координатных сеток / А.А. Рихтер [и др.] / М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян, А.А. Рихтер // Информация и Космос. – 2018. – № 2. – С. 104–110.

27. Pattern recognition algorithm using descriptors combined radio and visible spectra / A.A. Rihter [et al.] // Proc. SPIE 10221, Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2017, 1022107 (23 May 2017); doi: 10.1117/12.2262875.

Решение задачи Лаунхардта в нечеткой ситуации

Task of accommodation of the spatial object based on the use of the fuzzy information situations

Цветков / Tsvetkov V.

Виктор Яковлевич

(cvj2@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.
АО «Научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на
железнодорожном транспорте»,
заместитель руководителя.
г. Москва

Филатов / Filatov V.

Валерий Николаевич

(filatov@itain.ru)

доктор военных наук, профессор,
почетный геодезист,
действительный член Академии военных наук.
АО «Российские космические системы»,
главный конструктор по геодезическому обеспечению.
г. Санкт-Петербург

Ознамец / Oznamets V.

Владимир Владимирович

(voznam@bk.ru)

кандидат технических наук, профессор,
почетный работник высшего профессионального
образования РФ, эксперт РАН.
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет геодезии и картографии»,
заведующий кафедрой геодезии.
г. Москва

Ключевые слова: геодезическое обеспечение – geodetic support; нечеткие множества – fuzzy sets; мягкие вычисления – soft computing; пространственный анализ – spatial analysis; информационная ситуация – information situation; нечеткая информационная ситуация – fuzzy informational situation.

Рассматривается задача размещения пространственного объекта в условиях нечеткой информации. Раскрывается постановка задачи размещения. Вводятся понятия «нечеткая информационная ситуация» и «нечеткая пространственная информационная ситуация». Показано различие между четкой информационной ситуацией и нечеткой информационной ситуацией. Описана связь между лингвистическим переменными и информационной ситуацией. Показано, что поиск оптимума основан на пересечении нечетких множеств. Дано решение задачи в двух вариантах: при условии равнозначности критериев размещения и при условии их неравнозначности. Описаны условия и ограничения данного метода. Отмечено предпочтение применения термина «целесообразность» при мягких вычислениях термину «оптимальность». Метод позволяет проводить пространственный анализ при достаточно большом числе критериев.

The scenario of positioning spatial object on the assumption of fuzzy data availability is studied. The scenario of positioning is developed. The terms "fuzzy information situation" and "fuzzy spatial information situation" are introduced. The distinction between clear information situation and fuzzy information situation has been shown. The relationship between linguistic variables and information situation has been described. It has been demonstrated that optimum search is based on intersection of fuzzy sets. Two options of problem solving have been presented: on the assumption of arrangement criteria equivalence and inequivalence. The conditions and limitations of this method have been described. It has been noted that the term "feasibility" is more preferable compared to the term "optimality" with regard to soft computing. The method allows for spatial analysis with sufficiently large number of criteria.

Введение

В практике городского планирования и строительства возникает важная задача выбора места размещения объекта [1–3] в соответствии с достижением максимальной полезности. Задачи пространственного размещения ресурсов относятся к области геодезического обеспечения. Задачи рационального размещения ресурсов решаются более двух столетий, начиная с работ Иоганна фон Тюнена (1826 г.) [4, 5]. Теория размещения производства [4], является частью региональной экономики. Эта теория решает задачи, где и почему какая-то хозяйственная деятельность находится там, где находится, и базируется на принципе, что фирмы выбирают месторасположения, которые будут максимизировать их прибыль, а частные лица выбирают те места, которые максимизируют собственную полезность. Развитием теории размещения послужили работы Вильгельма Лаунхардта (1885 г.). Его знаменитый треугольник Лаунхардта [6] или «Рациональный штандорт» применяют до настоящего времени. Однако в реальности этот метод не находит широкого применения из-за идеализации условий применения и отсутствия учета реальных особенностей размещения. Для решения задачи размещения применяют различные методы. Можно отметить классический или простейший комбинаторный метод [7]. Широко применяют метод размещения с использованием сетевых моделей [8]. Для размещения территориальных объектов в геомаркетинге применяют теорию массового обслуживания [9]. В условиях отсутствия полной информации применяют численные методы [10]. Общим недостатком большинства методов размещения является требование четкой информации, что в современных условиях динамики и роста информационных объемов не всегда выполнимо. Поэтому решение задачи размещения с использованием нечеткой информации представляет практический и теоретический интерес.

Теоретическая часть

Размещение ресурсов и объектов на местности относится к области геодезического обеспечения управления территориями. Модель задачи размещения объектов на местности требует анализа значений лингвистических переменных, описывающих нечеткие оценки места размещения в соответствии с заданными критериями оценки. При наличии четкой информации для описания объектов и их окружения применяют модель информационной ситуации [11]. Обычная информационная ситуация и пространственная информационная ситуация [12] обладает четкостью. Она описывает не только объект на местности, но и все его важнейшие связи и пространственные отношения [13].

Нечеткая информационная ситуация \hat{s} , как и положено нечеткой модели, описывает отдельные аспекты информационной ситуации. При этом в качестве значений она использует не точечные значения, а интервальные или

треугольные. Она характеризуется лингвистическими переменными y , значения которых имеют различные степени истинности или принадлежности базовому множеству значений [14] U .

$$\hat{s} = \{(\mu_s(y_k)), y_k \in U, \tag{1}$$

$$\mu_s(y_k) = \{\mu_{s(ykl)}(T_l^k)\}; \mu_s \in [0, 1] \tag{2}$$

где $k = 1, \dots, P$; – множество критериев оценки ситуации $l = 1, \dots, q_k$, – множество термов данного критерия; T_l^k – значение термина лингвистической переменной y_k по критерию k и по значению l внутри этого критерия. Символ $\{\}$ применяют для обозначения набора или коллекции данных

$$\{a\} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\} \tag{3}$$

В отдельных случаях выражение (3) можно рассматривать как вектор. Каждое место размещения будет характеризоваться набором значений лингвистических переменных, описывающих параметры мест размещения, и будет описано с помощью соответствующей нечеткой ситуации $\hat{s}_i, i=1 \dots n$

$$\hat{s}_i = \{(\mu_s(x_k)), = \{\mu_{s(xki)}(T_l^k)\} \tag{4}$$

Исследуем множество X , включающее n альтернативных мест размещения пространственных объектов:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$$

Полезность или предпочтительность [15] размещения оценивается на основе множества критериев $K = K_1, K_2, \dots, K_p$. Следует отметить особенность решения данной задачи. Поскольку исходные условия не являются четкими, то говорить об оптимальности решения не представляется корректным. Можно говорить о квазиоптимальности, целесообразности решения, о полезности решения или о предпочтительности решения. Ситуационный анализ и нечеткий анализ, как правило, является сравнительным [16]. Его решения имеют в качестве области истинности только исследуемую совокупность объектов или ситуаций. Поэтому сравнительная полезность или целесообразность решения является условной и может измениться при включении новых объектов в совокупность.

Каждая нечеткая информационная ситуация (4) может быть выражена через нечеткое термальное множество (T^k) , где $\{(\mu_s(x_k))\}$ – конкретная лингвистическая оценка места x_i по критерию K_k , характеризующая степень соответствия альтернативы понятию, определяемому критерием K_k .

Значения оценок μ вычисляются по формулам мягких вычислений, но с учетом качества критерия. На практике критерии имеют два качества. Одни требуют максимума (например, прибыль), другие минимума (например, затраты). Поэтому с учетом каче-

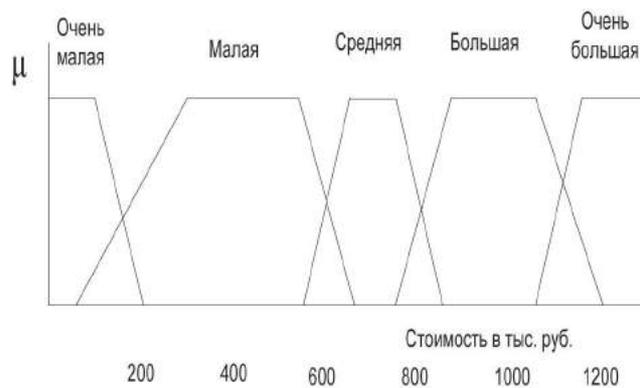


Рис. 1. Стоимость размещения автозаправки

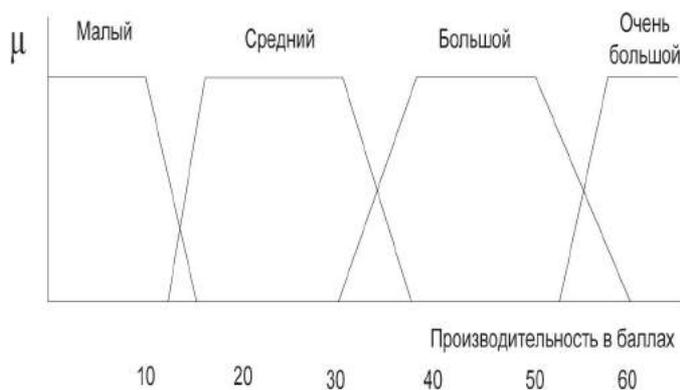


Рис.2. Терм-множество лингвистической переменной «Объем работы»

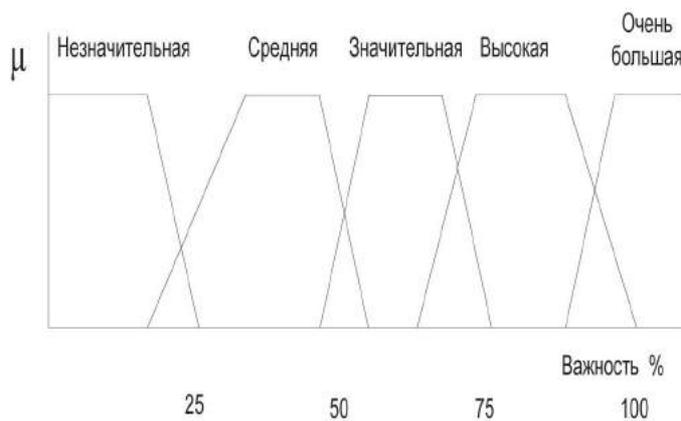


Рис. 3. Терм-множество лингвистической переменной «важность объекта»

Таблица 1

Параметры мест размещения

Места	Стоимость размещения	Объем работ	Важность
x_1	малая	средний	высокая
x_2	большая	малый	высокая
x_3	очень малая	большой	высокая
x_4	очень большая	средняя	высокая
x_5	большая	малый	незначительная
x_6	средняя	очень большой	высокая
x_7	малая	большой	очень большая

ства критерия производят лингвистические оценки, в одних случаях ищут максимум, в других – минимум. Возможны и более сложные минимаксные или максимум-минимумные варианты [17].

Значения оценок лингвистических переменных $\{\mu_{s(xk)}(T^k)\}$, $k=1, \dots, P$ вычисляются по формулам [2] для двух вариантов. При требовании минимизации критерия, описываемого лингвистической переменной y_k применяют формулу (5)

$$\mu_{\bar{s}_i}(y_k) = \frac{q_k}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_1^k) + \frac{q_k - 1}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_2^k) + \frac{q_k - 2}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_3^k) + \dots + \frac{1}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_{q_k}^k) \quad (5)$$

При требовании максимизации критерия, описываемого лингвистической переменной y_k , применяют формулу (6)

$$\mu_{\bar{s}_i}(y_k) = \frac{q_k}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_{q_k}^k) + \frac{q_k - 1}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_{q_k-1}^k) + \frac{q_k - 2}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_{q_k-2}^k) + \dots + \frac{1}{q_k} \cdot \mu_{\mu_{s_i}(y_k)}(T_1^k) \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) величина q_k определяется количеством термов для критерия K .

Если имеется P критериев: $K=K_1, K_2, \dots, K_P$, то лучшей считается альтернатива, удовлетворяющая большему числу критериев. Отсюда [18] правило для выбора наилучшей альтернативы может быть записано в виде пересечения соответствующих нечетких множеств. Операции пересечения нечетких множеств соответствует операция \min , выполняемая над их функциями принадлежности:

$$\mu_D(x_i) = \min_{k=1, \dots, P} \mu_{\bar{s}_i}(y_k), \quad i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

В качестве лучшей альтернативы будет выбираться объект x^* , имеющий наибольшее значение функции принадлежности

$$\mu_D(x^*) = \max_i \mu_D(x_i), \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Экспериментальные исследования

Рассмотрим работу этого метода на примере, задавая пошаговую последовательность действий. Общая задача найти место размещения автозаправочной станции.

Шаг 1. Заданы три критерия размещения автозаправочной станции: стоимость размещения, объем работы автозаправки, социальная важность для города. Последний критерий обусловлен тем, что заправка выполняет социальные функции по обслуживанию населения. В ней, как правило, имеется торговая точка, которая обслуживает население района. На рис. 1 приведена лингвистическая переменная, характеризующая первый критерий.

На рис. 2 приведена лингвистическая переменная, характеризующая второй критерий – объем работы автозаправки. Объем работы может быть выражен в натуральных и условных сравнительных единицах. На рис. 2 использованы сравнительные единицы.

На рис. 3 приведена лингвистическая переменная, характеризующая третий критерий – важность объекта. Важность объекта может быть выражена в экспертных баллах или процентах. На рис. 2 использованы проценты.

Шаг 2. На основе предварительного обследования выявлено семь возможных мест размещения автоза-

Таблица 2

Расчет лингвистических переменных для нечетких ситуаций

Места	Стоимость размещения	Объем работ	Важность	$\mu_D(x_i)$
x_1	малая	небольшой	большая	
$\mu_{s1}(y_k)$	4/5	2/4	2/5	2/5
x_2	большая	довольно малый	малая	
$\mu_{s2}(y_k)$	2/5	1/4	1/5	1/5
x_3	очень малая	большой	небольшая	
$\mu_{s3}(y_k)$	1	3/4	2/5	2/5
x_4	очень большая	небольшой	небольшая	
$\mu_{s4}(y_k)$	2/5	1/4	4/5	1/4
x_5	большая	малый	очень малая	
$\mu_{s5}(y_k)$	2/5	1/4	1/5	1/5
x_6	небольшая	Очень большой	большая	
$\mu_{s6}(y_k)$	3/5	1/4	4/5	1/4
x_7	малая	большой	очень большая	
$\mu_{s7}(y_k)$	4/5	3/4	1	3/4

правки. После этого места размещения оценены в соответствии с тремя вышеупомянутыми критериями. В реальной практике критериев может быть больше. Ограничение обусловлено только вычислительными ресурсами. Результаты предварительной оценки представлены в таблице 1.

Шаг 3. Зададим нечеткие ситуации для каждого из мест размещения объекта.

$$\begin{aligned} \hat{s}_{11} &= \{[(0/ом), (1/м), (0/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{12} &= \{[(0/м), (1/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{13} &= \{[(0/нз), (1/с), (0/з), (1/в), (0/об)]\} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \hat{s}_{21} &= \{[(0/ом), (0/м), (0/с), (1/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{22} &= \{[(1/м), (0/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{23} &= \{[(1/нз), (0/с), (0/з), (1/в), (0/об)]\} \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \hat{s}_{31} &= \{[(1/ом), (0/м), (0/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{32} &= \{[(1/м), (0/с), (1/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{33} &= \{[(0/нз), (1/с), (0/з), (1/в), (0/об)]\} \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \hat{s}_{41} &= \{[(0/ом), (0/м), (0/с), (0/б), (1/об)]\} \\ \hat{s}_{42} &= \{[(0/м), (1/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{43} &= \{[(0/нз), (0/с), (1/з), (1/в), (0/об)]\} \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \hat{s}_{51} &= \{[(0/ом), (0/м), (0/с), (1/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{52} &= \{[(1/м), (0/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{53} &= \{[(1/нз), (0/с), (0/з), (0/в), (0/об)]\} \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \hat{s}_{61} &= \{[(0/ом), (0/м), (1/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{62} &= \{[(1/м), (0/с), (0/б), (1/об)]\} \\ \hat{s}_{63} &= \{[(0/нз), (0/с), (0/з), (1/в), (0/об)]\} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \hat{s}_{71} &= \{[(0/ом), (1/м), (0/с), (0/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{72} &= \{[(0/м), (0/с), (1/б), (0/об)]\} \\ \hat{s}_{73} &= \{[(0/нз), (0/с), (0/з), (0/в), (1/об)]\} \end{aligned} \tag{15}$$

В выражениях (9–15) описания нечетких ситуаций верхние строки соответствуют первому критерию, средние строки второму критерию и нижние строки соответствуют третьему критерию. В выражениях (9–15) применены обозначения в соответствии с критериями из рис. 1–3. Для первого критерия: ом – очень малая, м – малая, с – средняя, б – большая, об – очень большая. Для второго критерия следующие обозначения: м – малый, с – средний, б – большой, об – очень большой. Для третьего критерия использованы следующие обозначения: нз – незначительная, с – средняя, з – значительная, об – очень большая. Принципиальным является то, что всем качественным критериям соответствуют термы множества, которые приведены на рис. 1–3. Названия термов могут быть

Значения лингвистических переменных с учетом важности критериев

Места	Стоимость размещения	Объем работ	Важность	$\mu_D(x_i)$
$\mu_{s_1}^*(y_k)$	0,56	0,05	0,08	0,05
$\mu_{s_2}^*(y_k)$	0,28	0,025	0,04	0,025
$\mu_{s_3}^*(y_k)$	0,7	0,075	0,08	0,075
$\mu_{s_4}^*(y_k)$	0,28	0,025	0,16	0,025
$\mu_{s_5}^*(y_k)$	0,28	0,025	0,04	0,025
$\mu_{s_6}^*(y_k)$	0,42	0,025	0,16	0,025
$\mu_{s_7}^*(y_k)$	0,56	0,075	0,2	0,075

любые. Главное – это количественное определение лингвистической переменной.

Шаг 4. Для каждой ситуации и для каждой лингвистической переменной рассчитаем значения $\mu_{s_i(y_k)}(y_k)$, $k = 1, \dots, P$, по формулам (5–6), а также найдем пересечение нечетких множеств по формуле (7). Результаты показаны в таблице 2.

Шаг 5. Выбор предпочтительного места.

Тогда, согласно формуле (8), наилучшей будет альтернатива x_7 , так как значение $\mu_D(x^*) = \max \mu_D(x_i) = 3/4$. Таким образом, анализ нечетких информационных ситуаций дает возможность выбрать место наиболее целесообразного размещения пространственного объекта.

Это решение получено в предположении того что критерии выбора меча K_1, K_2, K_3 – равнозначны. Обычно неравнозначность может быть заложена в термы. Однако на практике, при проектировании или строительстве, возможны ситуации, когда факторы экономической целесообразности становятся менее значимы, чем социальные факторы. Или наоборот, экономическая целесообразность важнее социальных факторов. В этом случае для перераспределения результатов вводят веса факторов.

В этом случае, если критерии имеют разную важность, каждому из них приписывается вес $1 > \alpha_k > 0$ (чем важнее критерий, тем больше α_k).

Для определения веса вводят коэффициенты N относительной важности на основе экспертного оценивания. Важность может быть оценена любым числом, но затем этот числовой ряд нормируют и превращают в весовой ряд. Затем необходимо учесть влияние коэффициентов α_k на соответствующие значения лингвистических переменных. Этот учет осуществляется путем преобразования

$$\mu_{s_1}^*(y_k) = \alpha_k \mu_{s_1}(y_k) \tag{16}$$

Дополним рассмотренный пример условием различной важности критериев. Оценим важность критерия 1 значением $N=7$, важность критерия 2 оценим значе-

нием $N=1$, важность критерия 3 оценим значением $N=2$. Нормировка даст значения весов $\alpha_k : 0,7, 0,1, 0,2$. Пересчитываем таблицу 2 на основе формулы (16). Результаты приведены в таблице 3.

По формуле (8) максимальное из всех значений будет равно 0,075. Это соответствует двум местам размещения x_3 и x_7 . Для дополнительного анализа учтем то, что в данном случае критерий 1 более важен, чем критерий 3. По этому критерию (таблица 1) место x_3 предпочтительнее x_7 . В итоге выбираем место x_3 для размещения автозаправки.

Обсуждение

Предложенный метод позволяет принимать решения в условиях нечеткой информации. Однако следует учитывать его условность, которая присуща многим методам анализа в области мягких вычислений. Результаты анализа являются сравнительными. Они распространяются только на исследуемую совокупность объектов анализа. Результаты анализа не являются оптимальными, а условно оптимальными или целесообразными. Нечеткость информации сопоставима с погрешностью вычислений, поэтому выбор оптимальных вариантов для такого случая сопоставим с расчетами при существенных погрешностях. Если оптимизирующая функция не является унимодальной, то даже незначительная погрешность может привести к определению не самого оптимально решения. Такое решение является одним из оптимальных, но не самым оптимальным. Поэтому решения, находимые с помощью теории нечетких множеств, следует называть целесообразными или нечетко оптимальными.

Заключение

В данной работе дано решение задачи размещения при наличии нечетких условий размещения и отсутствии четкой информации. Результатом работы явля-

ется описанный и апробированный метод решения задачи пространственного размещения при отсутствии четкой информации. Эффективность метода состоит в том, что он позволяет осуществлять анализ, выбор альтернативы и принятие решений в условиях, при которых обычные методы оптимизации решение не дают. Эффективность метода заключается в расширении возможностей принятия решений при использовании нечеткой информации.

Предложенный метод помогает принимать решения в нечетких ситуациях при соблюдении ряда условий. Необходимо иметь или задать качественные характеристики, описывающие ситуацию по какому-либо критерию. Каждой качественной характеристике необходимо поставить в соответствие количественные значения. Обязательным условием является формирование терм-множества для каждого критерия на основе привязки к количественным значениям реальных условий. После определения терм-множества выбирают альтернативы для принятия решений. Каждую альтернативу оценивают по выбранным критериям. На основе оценки формируют таблицу лингвистических переменных. Используют принципы мягких вычислений пересечения нечетких множеств. В случае различной важности критериев вводят веса критериев и пересчитывают лингвистические переменные. Работа показывает, что есть основание вводить новые понятия: «нечеткая информационная ситуация», «нечеткая информационная пространственная ситуация» для решения пространственных задач и пространственного анализа.

Литература

1. Николаев, С. А. Межрайонный и внутрирайонный анализ размещения производительных сил / С.А. Николаев. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
2. Розенберг, И. Н. Решение задач размещения с нечеткими данными с использованием геоинформационных систем / И.Н. Розенберг, Т.А. Старостина. – М.: Научный мир, 2006. – 208 с.
3. Цветков, В. Я. Геоинформационный анализ задач размещения / В.Я. Цветков, С.Г. Семушкина // Вестник Московского государственного областного педагогического университета. Серия Экономика. – 2009. – № 4. – С. 61–64.
4. Блауг, М. Тюнен, Иоганн Генрих фон // 100 великих экономистов до Кейнса / М. Блауг. – СПб.: Экономикс, 2008. – С. 299.
5. Горбунов, В. С. Использование модели Й. фон Тюнена в современной региональной экономике / В.С. Горбунов // Московский экономический журнал. – 2017. – № 2. – С. 1–10.
6. Launhardt W. Mathematische Begründung der Volkswirtschaftslehre. – W. Engelmann, 1885.
7. Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности / В.Р. Жачатуров [и др.]. – М.: Наука, 2000. – 360 с.
8. Гимади, Э. Х. Задача размещения на сети с центрально-связными областями обслуживания / Э.Х. Гимади // Управ-

ляемые системы: Сб. науч. тр. Новосибирск: Ин-т математики СО АН СССР. – 1984. – № 25. – С. 38–47.

9. Цветков, В. Я. Геомаркетинг: Прикладные задачи и методы / В.Я. Цветков. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 240 с.
10. Серов, С. С. Динамическая задача размещения предприятий отрасли и численный метод ее решения / С.С. Серов, А.П. Уздемир // Автоматика и телемеханика. – 1976. – № 4. – С. 120–127.
11. Цветков, В. Я. Модель информационной ситуации / В.Я. Цветков // Перспективы науки и образования. – 2017. – № 3 (27). – С. 13–19.
12. Павлов, А. И. Пространственная информационная ситуация / А.И. Павлов // Славянский форум. – 2016. – № 4 (14). – С. 198–203.
13. Савиных, В. П. Информационные пространственные отношения / В.П. Савиных // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 1 (18). – С. 79–88.
14. Мелихов, А. Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1990. – 272 с.
15. Цветков, В. Я. Основы теории предпочтений / В.Я. Цветков. – М.: МАКС Пресс, 2004. – 48с.
16. Корячко, В. П. Интеллектуальные системы и нечеткая логика / В.П. Корячко, М.А. Бакулева, В.И. Орешков. – М.: КУРС, 2017. – 352 с.
17. Тихонов, А. Н. Методы и системы поддержки принятия решений / А.Н. Тихонов, В.Я. Цветков. – М.: МАКС Пресс, 2001. – 312с.
18. Борисов, А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.

Алгоритм векторного решения некомпланарной засечки

Algorithm for vector solution of noncoplanar problem

Дышленко / Dyshlenko S.

Сергей Геннадьевич

(dishlenko@yandex.ru)

кандидат технических наук.

ФГУ «ФНЦ НИИ системных исследований РАН»,
заведующий сектором "Прикладных систем".

г. Москва

Ключевые слова: прямая засечка – intersection; условие коллинеарности – collinearity condition; условие компланарности – coplanarity condition; некомпланарная засечка – noncoplanar intersection; error estimate – оценка погрешности; weighting factor – весовой коэффициент.

В статье предлагается алгоритм решения прямой засечки при нарушении условия компланарности. Классический алгоритм с сохранением условия компланарности входит в данный алгоритм как частный случай. Для анализа алгоритма первоначально рассматривается прямая засечка для идеальной стереопары. В статье доказано, что наличие погрешностей измерения координат точек снимка создает условия для нарушения условия компланарности. Основная идея алгоритма заключается в рассмотрении некомпланарных векторов как скрещивающихся прямых. Кратчайшее расстояние между двумя векторами, направленными по скрещивающимся прямым, коллинеарно векторному произведению. Эта закономерность дает основание ввести векторное произведение некомпланарных векторов в уравнение решения засечки. Расстояние между некомпланарными прямыми дает возможность оценить погрешность вычислений. Это позволяет оценивать качество обработки информации.

The article offers algorithm for solving intersection problem in case of coplanarity condition violation. The classical algorithm with preservation of coplanarity is included in this algorithm as a special case. In order to perform algorithm analysis, intersection for ideal stereo pair is initially studied. It has been proven in the article that availability of errors in measuring of an image position data enables violation of coplanarity condition. The basic idea of the algorithm is to consider noncoplanar vectors as intersecting straight lines. The shortest distance between two vectors directed along intersecting straight lines is collinear to a vector product. This conformity gives grounds to introduce cross product of noncoplanar vectors into the equation for solving intersection problem. Computational error can be evaluated based on the distance between noncoplanar straight lines. Thus, quality of information processing can be assessed.

Введение

В настоящее время расширяется применение фотограмметрических методов при решении прикладных задач [1, 2]. Решение прикладных задач связано с решениями прямой и обратной засечек [3]. Наряду с методами цифрового моделирования развиваются методы фотограмметрии, связанные с применением неметрических камер [4] и малых носителей фотосъемки [5]. Особо следует отметить применение мотодельтопланов и беспилотных летательных аппаратов [5, 6]. Небольшая полезная нагрузка малых носителей исключает такие приборы как гироскоп или авиагоризонт. Поэтому большое значение приобретают адаптивные методы обработки информации, допускающие условия, которые при аэрофотосъемке не встречаются. К числу таких условий относится нарушение условия компланарности. Для решения уравнений с большим числом неизвестных необходимы дополнительные условия. Такими дополнительными условиями является включение векторного произведения некомпланарных векторов в уравнение решения прямой засечки. Данный подход уже апробирован при съемке поверхности с космического аппарата [7, 8]. В том подходе дополнительной информацией была информация о баллистической траектории аппарата. Съемка велась одной камерой с разных точек траектории. Данная статья развивает подход применительно к малым носителям и съемке с помощью разных камер. Такая съемка допускает применение не только разных камер, но и произвольных углов наклона камеры.

Решение компланарной засечки

Условие компланарности является основой решения многих фотограмметрических и геодезических засечек [9, 10]. На рис. 1 представлена типовая модель компланарной засечки из области фотограмметрии. На рисунке приведена стереопара снимков, имеющих точки фотографирования S_1, S_2 . Параметр B означает базис съемки.

На местности существует некая точка M , изображение которой получают на обеих снимках. Условно снимки называются первый и второй. Изображение точки M на первом снимке обозначено как m_1 . Изображение точки M на втором снимке обозначено как m_2 . В нормальной съемке эти снимки образуют стереопару. Разницы координат изображений точки M создают параллаксы. Их определяют как горизонтальный параллакс

$$p = x_1 - x_2$$

и вертикальный параллакс

$$q = y_1 - y_2$$

Эти величины служат основой расчета координат точки M на местности.

Иногда говорят об идеальной стереопаре. Это пара снимков, полученных одной камерой или камерами с одинаковым фокусным расстоянием, плоскости снимков параллельны друг другу и координатной плоскости $ХОУ$ на местности. Для такой стереопары

$$q = y_1 - y_2 = 0 \quad (1)$$

Выражение (1) есть условие компланарности для идеальной стереопары. Особенность такого подхода в том, что он не учитывает ошибки измерений и формирования изображений точки M . При учете ошибок измерений координат x_1, y_1 для первого снимка $\delta x_1, \delta y_1$ и ошибок измерений координат x_2, y_2 для второго снимка $\delta x_2, \delta y_2$ имеет место вычисление параллаксов с учетом ошибок

$$p' = (x_1 + \delta x_1) - (x_2 + \delta x_2) \quad (2)$$

и вертикальный параллакс

$$q' = (y_1 + \delta y_1) - (y_2 + \delta y_2) \quad (3)$$

или

$$p' = p \pm 2 \delta x;$$

$$q' = q \pm 2 \delta y$$

Если ошибки существенны, то имеет место

$$q' = q \pm 2 \delta y \neq 0 \quad (4)$$

Выражение (4) обозначает нарушение условия компланарности. Оно означает, что условие компланарности в данной ситуации не выполняется и использование выражения (1) приводит к ошибкам.

Модель некомпланарной засечки

На рис. 2 дана модель некомпланарной засечки, которая может возникнуть при воздушной съемке. Рассмотрена неидеальная, произвольная стереопара.

На рис. 2 S_1, S_2 – точки фотографирования. B – базис фотографирования. M_1, M_2 – точки, которые лежат на концах пространственных векторов R_1, R_2 . Точки M_1, M_2 означают раздвоение точки M (рис.1) вследствие нарушения условия компланарности. Изображение точки M_1 на первом снимке обозначено как m_1 . Изображение точки M_2 на втором снимке обозначено как m_2 . В отличие от модели на рис. 1 в некомпланарной модели появились две точки M_1, M_2 . В случае выполнения условия компланарности точки M_1, M_2 сливаются в одну точку M (рис. 1).

По снимку определяют пространственные вектора моделей r_1, r_2 , – вектора, коллинеарные пространственным векторам R_1, R_2 , Начала этих векторов находятся в центрах проектирования S_1, S_2 , а концы упираются в плоскости снимков. Эти вектора можно назвать пространственными векторами фотограмметрических одиночных моделей. Вектора моделей r_1, r_2 коллинеарны пространственным векторам R_1, R_2 , которые направлены на искомую точку местности.

$$R_1 = N_1 r_1, \quad (5)$$

$$R_2 = N_2 r_2 \quad (6)$$

Выражения (5), (6) описывают условие коллинеарности между векторами модели и пространственными векторами. Вектора R_1, R_2 – пространственные вектора, которые в общем случае не лежат в одной плоскости. Модель на рис. 2 допускает нарушение условия компланарности, что в классической фотограмметрии [9, 10, 11] не допускается.

Вектора моделей r_1, r_2 являются измеряемыми и вычисляемыми [12]. Вектора R_1, R_2 вектора являются вычисляемыми. Их можно назвать векторами пространственной засечки. Поскольку вектора R_1, R_2 "зависают" в пространстве, возникает вопрос, как вычислить координаты их концов, то есть, какое математическое условие можно использовать для определения их длины?

Считаем, что концы пространственных векторов R_1, R_2 находятся в точках, которые соответствуют минимальному расстоянию между ними. В математике существует понятие "скрещивающиеся прямые" – это такие прямые, которые не лежат в одной плоскости [13, 14]. Скрещивающиеся прямые существуют только в трехмерном евклидовом пространстве. Две прямые в трёхмерном евклидовом пространстве скрещиваются, если не существует плоскости, их содержащей. Скрещивающиеся прямые – это две прямые в пространстве, не имеющие общих точек, и не являющиеся параллельными. Примером скрещивающихся прямых являются транспортные развязки дорог, из которых одна проходит над другой. Скрещивающиеся прямые это некомпланарные кривые и они полностью соответствуют модели на рис. 2.

Расстояние между скрещивающимися прямыми можно определить как длину отрезка M_1, M_2 . На отрезке

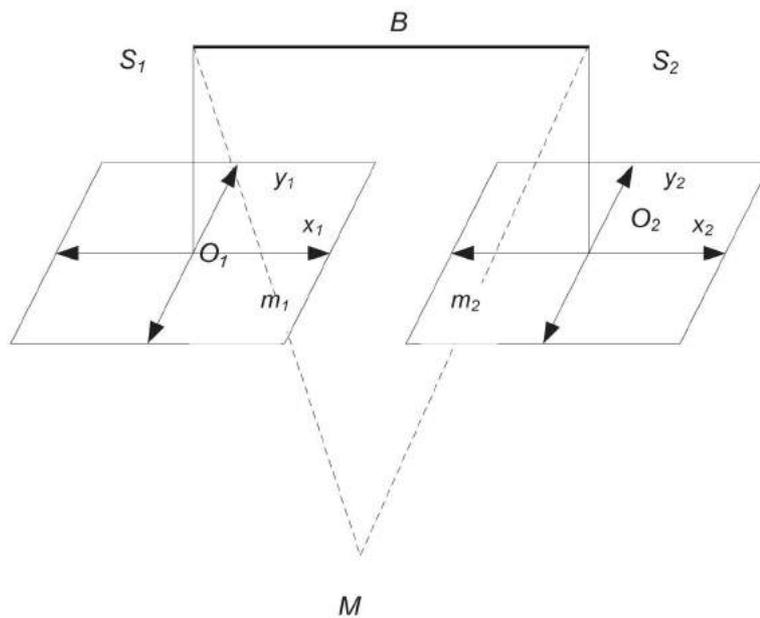


Рис. 1. Компланарная засечка

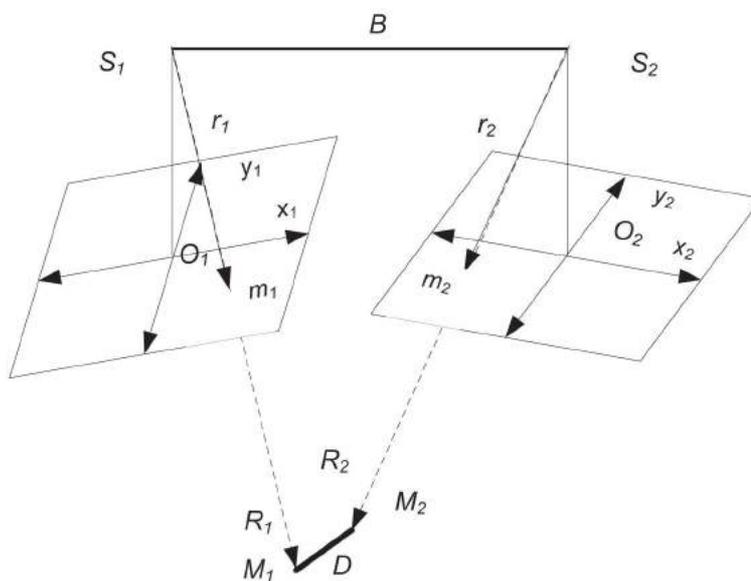


Рис. 2. Некомпланарная засечка

M_1, M_2 можно задать пространственный вектор некомпланарности D . Направление этого вектора определяется на основе операции векторного произведения между векторами R_1, R_2 . Таким образом, концы пространственных векторов R_1, R_2 будет замыкать пространственный вектор отрезок M_1, M_2 , направление которого определяет вектор некомпланарности D . Вектор D – «вектор некомпланарности», соединяющий концы радиус-векторов R_1, R_2 . На отрезке M_1, M_2 лежит определяемая точка M . Если пространственные вектора R_1, R_2 лежат в одной плоскости, то отрезок M_1, M_2 и пространственный вектор некомпланарности D равны нулю.

В пространстве моделей можно также ввести некомпланарный вектор – вектор модели d , параллельный пространственному вектору D . Вектора моделей r_1, r_2 определяются по координатам точек снимков и элементам внешнего ориентирования. Вектор d определяется по векторному произведению векторов моделей r_1, r_2

$$d = [r_1 \times r_2] \quad (7)$$

Выражение (7) дает возможность определить вектор d по измеренным и вычисляемым векторам моделей r_1, r_2 . Другими словами, решив обратную засечку, определив элементы внешнего ориентирования снимков и измерив координаты точек m_1, m_2 , можно определить вектора модели d, r_1, r_2 . Эти вектора задают характеристики определяемой точки местности. Определение величин d, r_1, r_2 является вспомогательной задачей. Главной задачей является определение R_1, R_2, D и точки M . Именно определение точки M , а не точек M_1, M_2 является главной задачей решения прямой засечки.

Вторым этапом является нахождение векторов R_1, R_2, D . Для этого на основании некомпланарной модели (рис. 2) векторное уравнение

$$R_1 + R_2 + D = B \quad (8)$$

B – базис съемки. Используя условия коллинеарности (5), (6) и выражение (7) приходим к уравнению.

$$N_1 r_1 + N_2 r_2 + N_3 d = B \quad (9)$$

В выражении (9) r, d – вектора модели, N_1, N_2, N_3 – масштабные коэффициенты, которые вычисляются при решении векторного уравнения (9). Векторное уравнение (9) распадается на систему трех линейных уравнений

$$N_1 r_{1x} + N_2 r_{2x} + N_3 d_x = B_x \quad (10)$$

$$N_1 r_{1y} + N_2 r_{2y} + N_3 d_y = B_y \quad (11)$$

$$N_1 r_{1z} + N_2 r_{2z} + N_3 d_z = B_z \quad (12)$$

Уравнения (10–12) позволяют найти масштабные коэффициенты N_1, N_2, N_3 . Для определения координат точки M можно применить выражение

$$R_M = R_{S_1} + N_1 r_1 + D \lambda \quad (13)$$

В выражении (13) R_M – вектор, направленный в точку M и задающий ее координаты относительно S_1 . R_{S_1} – радиус-вектор центра проектирования S_1 во внешней системе координат, λ – весовой коэффициент. Весовой коэффициент λ определяется по величине модулей проектирующих векторов.

$$\lambda = [R_1] / (R_1 + R_2) \quad (14)$$

Координата определяемой точки M рассчитывается не по положению конца проектирующего вектора R_1 , а как векторная сумма (13) проектирующего вектора и части вектора D , определяемая весовым коэффициентом.

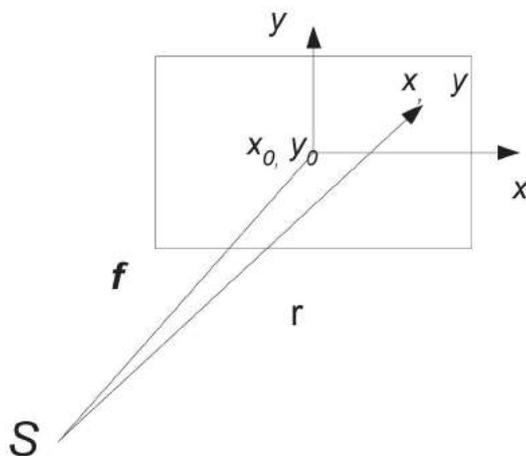


Рис. 3. Построение векторов r_1, r_2

Расчет погрешностей на основе алгоритма некомпланарной засечки

Ср.кв. ошибки измерения координат на снимке (мкм)	Рассчитанная погрешность (см)	Фактическая погрешность (см)	Точность расчета погрешностей %
12	11	11	100%
17	17	17	100%
21	23	25	92%
25	28	31	90%
28	34	34	100%
34	41	42	98%
37	47	51	92%
42	55	58	95%

Для применения алгоритма необходимо рассчитать вектора r_1, r_2 по измеренным координатам и параметрам снимков. Построение векторов иллюстрируется рис. 3.

Компоненты вектора r' в пространстве модели определяются как

$$r'_x = x - x_0; \quad r'_y = y - y_0; \quad r'_z = f$$

где x, y – координаты точки снимка изображения определяемой точки M ; x_0, y_0 – координаты главной точки снимка; f – фокусное расстояние.

Для перехода от вектора r' к вектору модели r во внешней системе координат (рис. 2) необходимо осуществить координатное преобразование для каждого снимка

$$r_x = a_{11} r'_x + a_{12} r'_y + a_{13} r'_z \quad (15)$$

$$r_y = a_{21} r'_x + a_{22} r'_y + a_{23} r'_z \quad (16)$$

$$r_z = a_{31} r'_x + a_{32} r'_y + a_{33} r'_z \quad (17)$$

Здесь a_{ij} – направляющие косинусы.

После того как вектора модели во внешней системе координат для каждого снимка найдены, производят решение засечки. Для этого решают линейную систему уравнений (10–12) с учетом весового коэффициента (14). Линейная система уравнений (10–12) решается без всяких приближений.

Такой подход дает возможность не только вычислять координаты точек модели, но и давать расчет погрешностей в каждой точке независимо. Погрешность оценивается с помощью весового коэффици-

ента. В таблице 1 приведены результаты эксперимента проверки алгоритма по вычислению координат и расчету погрешностей.

Для эксперимента были заданы координаты точек на местности. Были заданы условия съемки как параметры внешнего ориентирования фотокамер. Углы были заданы в пределах $\alpha \approx [\pm 5]$; $\omega \approx [\pm 3]$; $\chi \approx [\pm 1]$. На основе параметров снимков были рассчитаны координаты точек снимков. В координаты снимков с помощью датчика случайных чисел с известной дисперсией вводились погрешности. Производился расчет координат и расчет (прогноз) погрешности определения точек. Вычисленные координаты сравнивались с исходными, и на основе сравнения определялась фактическая погрешность.

Заключение

Данный метод позволяет получать новое решение прямой фотограмметрической засечки. Метод позволяет получить решение прямой засечки при нарушении условия компланарности. Метод позволяет получать не только координаты, но и оценивать погрешности каждой определяемой точки. Это можно использовать для уравнивания или последующей статистической обработке информации. Метод позволяет получить решение прямой засечки при использовании также геодезических угловых измерений. Для этого разности $x - x_0$; $y - y_0$ заменяются на тангенсы горизонтальных и вертикальных узлов. Фокусное расстояние снимка в этом случае заменяется на условную единицу. Алгоритм называется векторным, потому что основан на векторном анализе. Возможен другой подход решения

данной задачи с использованием матричных вычислений.

Литература

1. Чибуничев, А. Г. О возможностях применения цифровых методов фотограмметрии для решения инженерных задач / А.Г. Чибуничев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1990. – №. 6. – С. 76–82.
2. Цветков, В. Я. Составление обмерных чертежей архитектурных памятников с использованием архивных фотоснимков / В.Я. Цветков, Е.А. Ходорович. – М.: МК РСФСР, Ростреставрация, 1986. – 52 с.
3. Дышленко, С. Г. Прямая и обратная пространственная задача / С.Г. Дышленко // Славянский форум. – 2017. – № 1 (15). – С. 210–217.
4. Гурский, Р. Г. Алгоритмы и методы обработки информации, полученной неметрическими камерами / Р.Г. Гурский // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 1 (13). – С. 129–135.
5. Ознамец, В. В. Геомониторинг на транспорте с использованием БПЛА / В.В. Ознамец // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – № 1(5). – С. 43–53.
6. Ишбулатов, М. Г. Использование беспилотных летательных аппаратов для съемки населенных пунктов / М.Г. Ишбулатов, Э.И. Галеев, Р.И. Абдульманов // Состояние и перспективы увеличения производства высококачественной продукции сельского хозяйства. – 2016. – С. 42–45.
7. Tsvetkov, V. Principles of measurement of surfaces of extra-terrestrial territories / V. Tsvetkov // International journal of applied and fundamental research. – 2011. – No. 10. – P. 14.
8. Бармин, И. В. Дистанционный метод определения координат точек на поверхности планеты / И.В. Бармин, В.П. Савиных, В.Я. Цветков // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2013. – № 3. – С. 26–29.
9. Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия / Б.В. Краснопевцев. – М.: УПП "Репрография" МИИГАиК, 2008. – 160 с.
10. Бобир, Н. Я. Фотограмметрия / Н.Я. Бобир, А.Н. Лобанов, Г.Д. Федорук. – М.: Недра, 1974 – 368 с.
11. ГЕОДЕЗИЯ, КАРТОГРАФИЯ, ГЕОИНФОРМАТИКА, КАДАСТР. Энциклопедия. В 2 томах / под редакцией А.В. Бородко, В.П. Савиных. - Москва, 2008. Том I А-М.
12. Цветков, В. Я. Фактофиксирующие и интерпретирующие модели / В.Я. Цветков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 9–3. – С. 487.
13. Математика. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. – 848 с.
14. Математика, ее содержание, методы и значение. В 3 томах / Под ред. А.Д. Александрова, А.Н. Колмогорова, М.А. Лаврентьева. – М. АН СССР, 1956.

Минимизация метрических искажений снимков стереопары в процессе ректификации

Minimization of stereo pair images metric distortion during rectification process

Хруш / Khrusch R.

Роман Михайлович

(Chrusch@rambler.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

профессор кафедры фототопографии

и фотограмметрии.

г. Санкт-Петербург

Гринь / Grin A.

Александр Николаевич

(al-grin1@yandex.ru)

кандидат физико-математических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

профессор кафедры математики.

г. Санкт-Петербург

Соловьёв / Solovieov A.

Алексей Владимирович

(solov19882008@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

старший научный сотрудник

453 лаборатории ВИ (НИ).

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: ректификация – *rectification*; идеальная стереопара – *ideal stereo pair*; элементы ориентирования стереопары – *elements of stereo pair orientation*; фундаментальная матрица – *fundamental matrix*.

В статье предложен способ уменьшения геометрических искажений при ректификации стереопары с произвольными элементами ориентирования. Предложенный способ позволяет не только минимизировать искажения, но и выполнить их количественную оценку. Экспериментальная проверка предложенного способа показала возможность существенно повысить точность обработки.

The method for reducing geometric distortions during rectification of stereo pair with arbitrary orientation elements has been proposed in the article. Based on the proposed method it is possible not only to minimize the distortions, but also to perform their quantitative ratings. Experimental validation of the proposed method proved that it is possible to improve processing accuracy significantly.

В статье предлагается способ уменьшения геометрических искажений цифровых снимков стереопары при их преобразовании. Перед изложением основного содержания напомним отдельные определения и понятия, которые относятся к стереопаре снимков.

Такая необходимость, как нам представляется, вызвана следующими обстоятельствами. В переводных работах англоязычных источников встречаются определения и названия некоторых элементов стереопары снимков (рис. 1), которые отличаются от принятых в нашей фотограмметрической литературе, например в [1–3]. Подобные названия и понятия, к сожалению, появляются и в работах отечественных авторов, что может вносить путаницу и непонимание, особенно, если пользователями являются специалисты с непрофильным образованием.

Одним из центральных процессов фотограмметрической обработки перекрывающихся снимков является отождествление (идентификация) одноименных (соответственных) точек стереопары. При этом важное место отводится площадным способам корреляции, сущность которых состоит в анализе и сравнении окрестностей одноименных точек снимков стереопары. Очевидно, что в этом случае приходится выполнять множество вычислительных операций, так как необходимо анализировать всю площадь перекрытия снимков стереопары. Это важно особенно при автоматической обработке снимков, так как влияет на скорость и оперативность обработки [4].

Существенно ускорить процесс отождествления одноименных точек возможно, если их обнаруживать на базисных линиях (рис. 1). Здесь показано, что одноименные точки m_1 и m_2 находятся на одноименных базисных (эпиполярных) линиях m_1k_1 и m_2k_2 (все

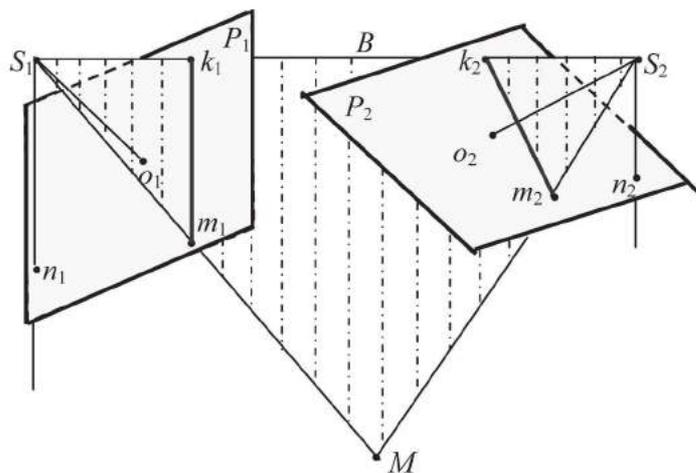


Рис. 1. Элементы стереопары

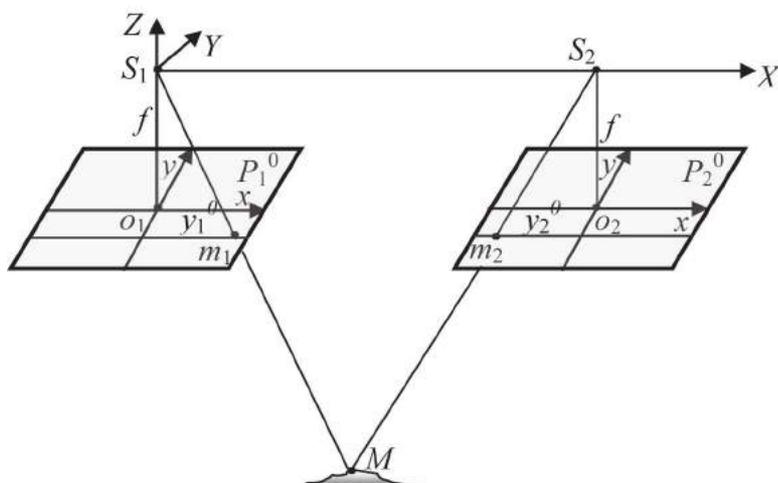


Рис. 2. Идеальная стереопара снимков

базисные линии сходятся в базисных точках (эпилюсах) k_1 и k_2). Поэтому, если определить одноименные базисные линии, поиск соответственных точек значительно облегчается.

Дальше встает вопрос об определении базисных линий. Проще всего базисные линии можно определить по идеальной стереопаре снимков (рис. 2).

На снимках идеальной стереопары, как известно, снимки преобразуются в условно горизонтальные, а их оси абсцисс становятся параллельными базису фотографирования. При этом базисные линии параллельны осям абсцисс и отстоят от них на равных расстояниях ($y_1^0 = y_2^0$). В результате поперечные параллаксы одноименных точек отсутствуют. Преобразование снимков общего случая в идеальную стереопару является тривиальной задачей, если известны элементы их взаимного ориентирования.

Однако важно определить базисные линии без выполнения взаимного ориентирования снимков. Такая задача решается с применением теоретических положений компьютерного зрения, где решение осуществляется с использованием уравнения взаимного ориентирования, выраженного через фундаментальную или существенную матрицу, а сам процесс называют ректификацией. Ректификация (название пришло из англоязычных текстов), в отечественных публикациях называется иногда и «выравниванием снимков» (название, дезориентирующее даже специалистов). Ректификация означает преобразование снимков в идеальную стереопару. На идеальной стереопаре, что очевидно, базисные линии определяются просто. Поэтому имеется возможность осуществлять поиск одноименных точек вдоль базисных линий, другими словами свести двумерный поиск к одномерному.

Известные алгоритмы ректификации приводят к метрическим искажениям изображений, что при работе с цифровыми изображениями вызывает уничтожение пикселей изображений или появление новых пикселей. Это обстоятельство нарушает взаимно-однозначное соответствие пикселей изображений цифровых снимков стереопары при их преобразовании и увеличивает погрешность последующего отождествления точек снимков. Поэтому возникает задача построения идеальной стереопары снимков с минимальными метрическими искажениями. В теории компьютерного зрения аналогичная задача решается путём минимизации функционала, определяемого сингулярными числами якобиана преобразования [5–7]. Цель такого решения – повышение геометрического качества изображения. Количественная оценка степени метрической деформации изображения при этом не производится, что важно для точности фотограмметрической обработки, в том числе – повышения точности отождествления одноименных точек стереопары.

Наш подход для решения поставленной задачи основан на минимизации метрической деформации изображений и ее количественной оценки. Пусть имеем

одноименные точки стереопары снимков, выраженные в однородных координатах $m = (u, v, -1)^T$, $m' = (u', v', -1)^T$. Фундаментальная матрица стереопары есть

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}.$$

Фундаментальная матрица ректифицированной (идеальной) стереопары снимков всегда имеет вид

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для одноименных точек стереопары выполняется условие: $(m')^T F m = 0$, а потому, если H', H – матрицы преобразования, приводящего к ректификации изображений, то:

$$(H')^T \times \tilde{F} \times H = F; \tag{1}$$

$$(m')^T \times (H')^T \times \tilde{F} \times H \times m = 0.$$

При этом $H \cdot m, H' \cdot m'$ являются изображениями одноименных точек на ректифицированных (трансформированных) снимках. Для того чтобы преобразования H, H' осуществляли ректификацию изображений, необходимо, чтобы их структура, согласно [5], имела вид:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ h_{21} & 1 & 0 \\ h_{31} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ h'_{21} & h'_{22} & h'_{23} \\ h'_{31} & h'_{32} & h'_{33} \end{bmatrix}.$$

Значения элементов этих матриц получаются из уравнения (1), которое, после перемножения матриц, примет вид

$$\begin{bmatrix} h'_{31} h_{21} & -h'_{21} h_{31} & h'_{31} - h'_{21} \\ h'_{32} h_{21} & -h'_{22} h_{31} & h'_{32} - h'_{22} \\ h'_{33} h_{21} & -h'_{23} h_{31} & h'_{33} - h'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Найденные преобразования не являются единственными, осуществляющими ректификацию. Если взять

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A' = \begin{bmatrix} \alpha'_{11} & \alpha'_{12} & \alpha'_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

то, поскольку $\tilde{F} A = \tilde{F}$ и $(A')^T \tilde{F} = \tilde{F}$, получим

$$(A' H')^T \tilde{F} (A H) = (H')^T (A')^T \tilde{F} A H = (H')^T \tilde{F} H = F.$$

Таким образом, преобразования $AN, A'H'$ также ректифицируют стереопару при любых значениях элементов матриц A, A' . Определим матрицы A, A' так, чтобы преобразования $AN, A'H'$ минимизировали нарушение взаимно-однозначного соответствия пикселей изображений до и после ректификации. Поскольку пиксел – двумерная структура, то появление или исчезновение пикселей в результате преобразований связано с изменением площади преобразованного снимка по отношению к исходному. Поэтому мерой метрического искажения будем рассматривать меру изменения площади треугольника с вершинами

$$m_1 = (u, v, -1)^T, m_2 = (u + \Delta_1, v, -1)^T, \\ m_3 = (u, v + \Delta_2, -1),$$

где Δ_1, Δ_2 – приращения координат.

До ректификации площадь такого треугольника равна $S_1 = \frac{1}{2} \Delta_1 \times \Delta_2$.

После ректификации:

$$S_2 = \frac{1}{2} |A \times H \times (m_2 - m_1) \times A \times H \times (m_3 - m_1)|,$$

то есть

$$S_2 = \frac{1}{2} |A \times H \times (\Delta_1, 0, 0)^T \times A \times H \times (0, \Delta_2, 0)^T|.$$

Подставляя в выражение S_2 матрицы A, H , получим

$$S_2 = \frac{1}{2} \sqrt{h_{31}^2 + h_{21}^2 \times a_{12}^2 + (a_{11} + a_{13} \times h_{31})^2} \times \Delta_1 \times \Delta_2, \quad (2)$$

Выберем элементы матрицы A так, чтобы величина отклонения площади треугольника с данными вершинами после ректификации от площади до ректификации была минимальной, то есть

$$d = \frac{1}{4} (\sqrt{h_{31}^2 + h_{21}^2 \times a_{12}^2 + (a_{11} + a_{13} \times h_{31})^2} - 1)^2 \times \Delta_1^2 \times \Delta_2^2$$

должна быть минимальной.

Решение системы, определяющей условия минимума d :

$$\begin{cases} \frac{\partial d}{\partial a_{11}} = 0; \\ \frac{\partial d}{\partial a_{12}} = 0; \\ \frac{\partial d}{\partial a_{13}} = 0; \end{cases} \quad (3)$$

даёт следующие результаты:

$$- \text{если } |h_{31}| < 1, h_{21} \neq 0, \text{ то } a_{11} + a_{13} \times h_{31} = 0, a_{12} = \frac{\sqrt{1 - h_{31}^2}}{h_{21}};$$

$$- \text{если } |h_{31}| < 1, h_{21} = 0, \text{ то } a_{11} = \sqrt{1 - h_{31}^2} - a_{13} \times h_{31};$$

$$- \text{если } |h_{31}| > 1, \text{ то } a_{12} = 0, a_{11} = -a_{13} \times h_{31}.$$

Проиллюстрируем полученные результаты на конкретной стереопаре снимков. Используя восьми точечный метод, была получена фундаментальная матрица стереопары:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0,11696 & 49,23315 & 1 \\ -1,40334 & -1,00293 & 49,20322 \end{bmatrix},$$

которая, на основании уравнения (1'), позволила найти матрицу H :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1,796 \times 10^{-3} & 1 & 0 \\ -0,79 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Поскольку

$$|h_{31}| < 1, h_{21} \neq 0, \text{ то } a_{11} + a_{13} \times h_{31} = 0, a_{12} = \frac{\sqrt{1 - h_{31}^2}}{h_{21}}.$$

Относительное изменение площади при этом составляет:

$$\delta_1 = \frac{|S_2 - S_1|}{S_1}, \delta_1 = 0.$$

Если процедуру минимизации не использовать, то значение площади S_2 составит

$$S_2' = \frac{1}{2} |H \times (m_2 - m_1) \times H \times (m_3 - m_1)|, \\ S_2' = \frac{1}{2} \sqrt{h_{31}^2 + 1} \times \Delta_1 \times \Delta_2,$$

что приведёт к относительному изменению площади $\delta_2 = 0,274$.

Процедура минимизации на 27% уменьшила степень метрических искажений. Таким образом, предложенный способ позволяет не только уменьшить геометрические искажения цифровых снимков стереопары при их преобразовании в идеальную стереопару, но и оценить величину таких искажений, что итоге позволит повысить точность конечных результатов.

Литература

1. Лобанов, А. Н., Фотограмметрия / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.

2. Хрущ, Р. М., Фотограмметрия / Р.М. Хрущ. – СПб.: изд. ВКА, 2011. – 541 с.

3. Михайлов, А. П. Фотограмметрия А.Г. / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев. – М.: МИИГАиК, 2016. – 294 с.

4. Райченко, Б. В. Практическое применение методов ключевых точек на примере сопоставления снимков со спутника «Канопус-В» / Б.В. Райченко, В.В. Некрасов // Геома-тика. – 2013. – № 2. – С. 52–58.

5. Ayache, N. Artificial Vision for Mobile Robots: Stereo Vision and Multisensory Perception: chapter 3 / N. Ayache. – The MIT Press, 1991. – 284 p.

6. Mallon, J. Projective Rectification from the Fundamental Matrix / J. Mallon, P. Whelan. – Dublin City University, 2005. – 148 p.

7. Соловьев, А. В. Метод автоматического определения одноименных точек для вычисления элементов взаимного ориентирования снимков / А.В. Соловьев // Геодезия и аэро-фотосъемка. – 2017. – № 1. – С. 40–44.

Формирование прогнозных изображений видимого диапазона на основе трехмерных цифровых моделей местности с текстурным покрытием

Generation of visible-range forecast images based on three-dimensional digital terrain models with a texture coating

Филиппских / Philippskih E.

Евгений Эдуардович
(phil_ml@list.ru, vka@mil.ru)
кандидат технических наук
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА имени А. Ф. Можайского),
начальник отдела.
г. Санкт-Петербург

Попов / Попов А.

Анатолий Васильевич
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук,
почетный работник науки и техники РФ.
ВКА имени А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник лаборатории.
г. Санкт-Петербург

Галкин / Galkin F.

Федор Александрович
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА имени А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник отдела.
г. Санкт-Петербург

Захарчук / Zaharchuk A.

Алексей Викторович
(vka@mil.ru)
ВКА имени А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник лаборатории.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: трехмерная цифровая модель местности – three-dimensional digital terrain model; текстурное покрытие – texture coating; прогнозное изображение – forecast image; видимый диапазон электромагнитного спектра – visible range of electromagnetic spectrum; оптико-электронное изображение – optoelectronic image; оптический датчик – optical sensor; дистанционное зондирование земной поверхности – remote sensing of the Earth surface.

В статье приводится описание предложенного авторами метода формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе использования трехмерных цифровых моделей местности, содержащих в своем составе текстурные покрытия. Рассмотрены варианты применения подобных прогнозных изображений при решении задач сопровождения на всех этапах их жизненного цикла существующих и перспективных оптических датчиков средств мониторинга земной поверхности. Представлены примеры расчета прогнозных изображений местности видимого диапазона с использованием разработанного экспериментального программного модуля, реализующего предложенный метод.

The article describes the method of producing forecast visible-range images based on the use of three-dimensional digital terrain models containing textural coatings, proposed by the authors. The options of using similar forecast images as the solution for maintenance of existing and prospective Earth surface monitoring optical sensors at all stages of their life cycle have been reviewed. Examples of visible-range terrain forecast images design based on experimental software module developed for implementation of the proposed method have been presented.

Введение

Постоянное совершенствование и интенсивное развитие датчиковых средств видимого диапазона спектра в составе комплексов дистанционного зондирования земной поверхности, размещаемых, в том числе, на воздушных носителях, обуславливают необходимость решения задач по сопровождению этапов их разработки, испытаний и непосредственного применения на основе использования прогнозных (модельных) изображений местности, рассчитываемых по результатам моделирования функционирования оптико-

электронных датчиков в составе рассматриваемых комплексов.

Один из возможных подходов, обеспечивающих качественное и оперативное решение задачи формирования подобного рода прогнозных изображений, основан на использовании в качестве исходной информации различных геопространственных данных (обеспечивающих в конечном итоге получение трехмерных ЦММ с текстурными покрытиями), параметров моделируемого оптико-электронного датчика (условий его внешнего и внутреннего ориентирования), а также соответствующих модельно-ориентированных методов автоматизированного формирования на их основе прогнозных изображений видимого диапазона.

При использовании такого модельно-ориентированного метода формирования прогнозных изображений видимого диапазона обеспечивается учет основных характерных особенностей изображений видимого диапазона.

Модельно-ориентированный метод формирования прогнозных изображений местности видимого диапазона

Предлагаемый метод формирования прогнозных изображений местности видимого диапазона предусматривает реализацию моделирования процессов функционирования оптико-электронных датчиков воздушных средств дистанционного зондирования земной поверхности на основе модельно-ориентированного подхода с использованием процедуры трассировки лучами трехмерных ЦММ, в том числе содержащих в своем составе высокодетальные текстурные покрытия (формируемые из геокодированных космofотоснимков земной поверхности высокого разрешения) [1].

Процедура трассировки лучами трехмерных ЦММ обеспечивает описание процесса распространения световых лучей от момента их генерации источником до попадания в фотоприемное устройство датчика, включая взаимодействие с объектами трехмерной сцены.

Источниками световых лучей являются объекты природного происхождения, например, Солнце и Луна, а приемниками – системы технического зрения (оптико-электронные датчики) и зрительные рецепторы человека (глаз наблюдателя). Основная идея метода трассировки лучей сводится к повторению геометрических преобразований траектории светового луча на пути источник-объект-приемник [2].

Ключевой задачей метода трассировки лучей является определение освещенности произвольной точки поверхности объектов трехмерной ЦММ. При этом отсутствие освещенности свидетельствует о затененности данной точки. Следовательно, метод трассировки лучей должен обеспечивать выявление видимых поверхностей и определять затененные области.

При моделировании работы датчиков видимого

диапазона спектра с использованием метода трассировки задается точка местоположения наблюдателя (оптического датчика), направление наблюдения (по азимуту и углу места) и, в общем случае, положение источника освещения (Солнца, Луны). Положение источника освещения задается с помощью угла места и угла в азимутальной плоскости.

На рис. 1 показана геометрическая интерпретация механизма трассировки лучами трехмерной ЦММ (объекта) при формировании прогнозных изображений местности в видимом диапазоне. От источника освещения L излучается световой пучок. Большинство лучей, испущенных источником, не попадает в фотоприемник S , а значит, и не влияет на формируемое в нем изображение. Лишь очень малая часть лучей после всех отражений и преломлений в конце концов попадает в фотоприемное устройство датчика, создавая при этом изображение трехмерной сцены в его рецепторах.

В этом случае для определения освещенности сцены при формировании оптического изображения предлагается использовать так называемый метод обратной трассировки [2]. Метод обратной трассировки подразумевает рассмотрение наблюдателя (оптического датчика) S (рис. 1) в качестве источника обратных лучей, который фактически аккумулирует все лучи, в действительности приходящие в приемник из определенного направления независимо от их начала.

При этом обеспечивается формирование и отображение на картинной плоскости проекции (рис. 1) следующих элементов:

- непрозрачных объектов, поглощающих обратные лучи;
- отражений от зеркальных поверхностей объектов;
- областей тени, образующихся в точках поверхности, заслоненных от источника другими объектами.

Рассмотрим более подробно процесс обратной трассировки трехмерных ЦММ (рис. 1). Все обратные лучи испускаются из опорной точки проекции S . Данная точка одновременно является точкой местоположения наблюдателя (оптического датчика) с координатами (x_S, y_S, z_S) . Направление линии визирования наблюдателя (оптического датчика) задается в азимутальной плоскости углом α , а в угломестной плоскости – углом β . Углы сектора обзора определяются параметрами оптической системы (датчика): фокусным расстоянием f (расстоянием от опорной точки проекции до картинной плоскости проекции) и размерами матрицы приемника с зарядовой связью (ПЗС), лежащей на картинной плоскости проекции. Обозначим угол сектора обзора в азимутальной плоскости как θ_1 , а в угломестной – θ_2 . Тогда выражения для расчета углов сектора обзора примут следующий вид

$$\theta_1 = 2 \cdot \arctg\left(\frac{a/2}{f}\right), \quad (1)$$

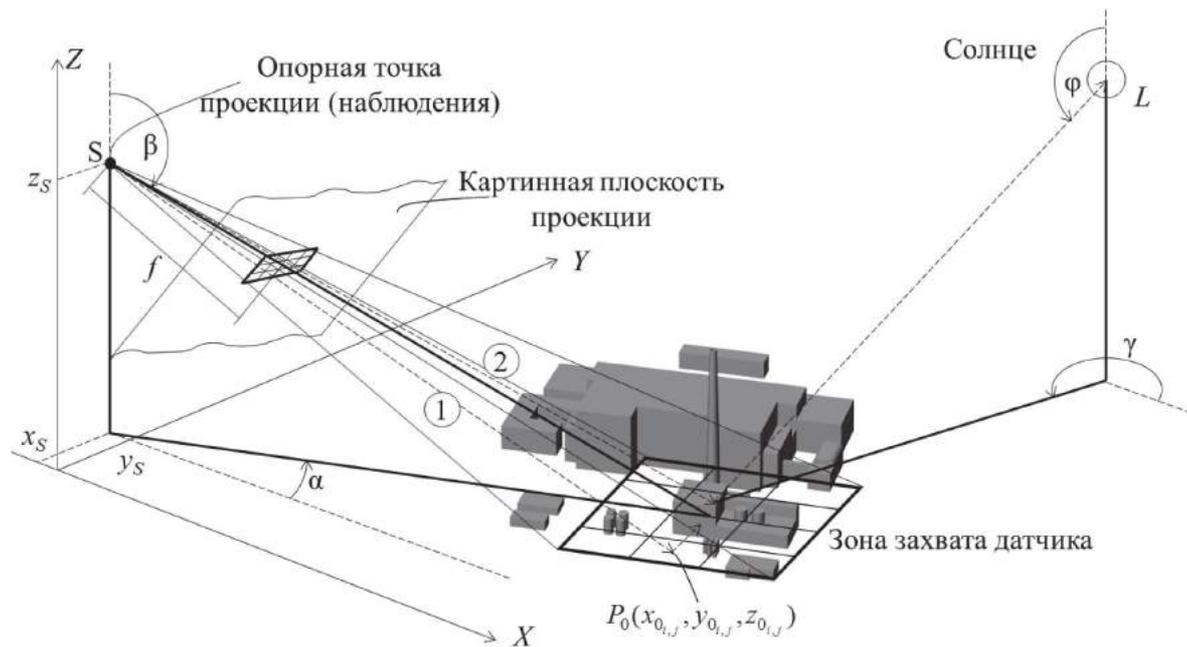


Рис. 1. Геометрическая интерпретация механизма трассировки лучами трехмерной ЦММ (объекта) при формировании прогнозных изображений местности в видимом диапазоне

$$\theta_2 = 2 \cdot \arctg\left(\frac{d/2}{f}\right), \quad (2)$$

где a – ширина матрицы ПЗС, м;
 d – высота матрицы ПЗС, м.

Матрица ПЗС характеризуется также линейными размерами элемента матрицы ПЗС, которые, в свою очередь, определяют общее количество этих элементов в составе матрицы ПЗС. Количество лучей трассировки, исходящих из точки наблюдения S , равно количеству элементов матрицы ПЗС. На рис. 2 показан пример матрицы ПЗС размером $M \times N$ элементов. Через элемент матрицы ПЗС $P_{m,n}$, находящийся на пересечении m -ой колонки и n -ой строки, проходит главная оптическая ось.

Координаты $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ точки пересечения главной оптической оси с картинной плоскостью проекции (матрицей ПЗС) $P_{m,n}$ (рис. 2) определяются по следующим выражениям для перехода от сферических координат к декартовым

$$x_{m,n} = x_s + f \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha), \quad (3)$$

$$y_{m,n} = y_s + f \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha), \quad (4)$$

$$z_{m,n} = z_s + f \cdot \cos(\beta). \quad (5)$$

Для задания $M \times N$ лучей трассировки необходимо определить координаты $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$, $i \in [0; M)$, $j \in [0; N)$ геометрических центров $C_{i,j}$ элементов матрицы ПЗС с использованием следующих выражений

$$x_{i,j} = x_{m,n} + r_{i,j} \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right); \quad (6)$$

$$y_{i,j} = y_{m,n} + r_{i,j} \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right); \quad (7)$$

$$z_{i,j} = z_{m,n} + r_{i,j} \cdot \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right), \quad i \in [m; M), \quad j \in [0; n], \quad (8)$$

где $r_{i,j}$ – расстояние (в картинной плоскости проекции) от центральной точки ПЗС матрицы с координатами $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ до точки геометрического центра элемента ПЗС матрицы $C_{i,j}$, находящейся на пересечении i -го столбца и j -ой строки.

Значения $r_{i,j}$ определяются исходя из линейных размеров элементов матрицы ПЗС.

Пространственное положение $N \times M$ лучей трассировки, исходящих из точки наблюдения $S(x_s, y_s, z_s)$, задается с помощью рассчитанных координат центров $C_{i,j}(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$, $i \in [0; M)$, $j \in [0; N)$ элементов матрицы ПЗС размером $N \times M$ в виде уравнения прямой

$$\frac{x - x_s}{x_{i,j} - x_s} = \frac{y - y_s}{y_{i,j} - y_s} = \frac{z - z_s}{z_{i,j} - z_s}, \quad i \in [0; M), \quad j \in [0; N). \quad (9)$$

Далее осуществляется непосредственно процесс трассировки ЦМ ФЦО всеми $N \times M$ лучами.

По известным координатам начальных и конечных точек можно определить уравнения прямых, в которых лежат трассирующие лучи. Данные уравнения имеют вид

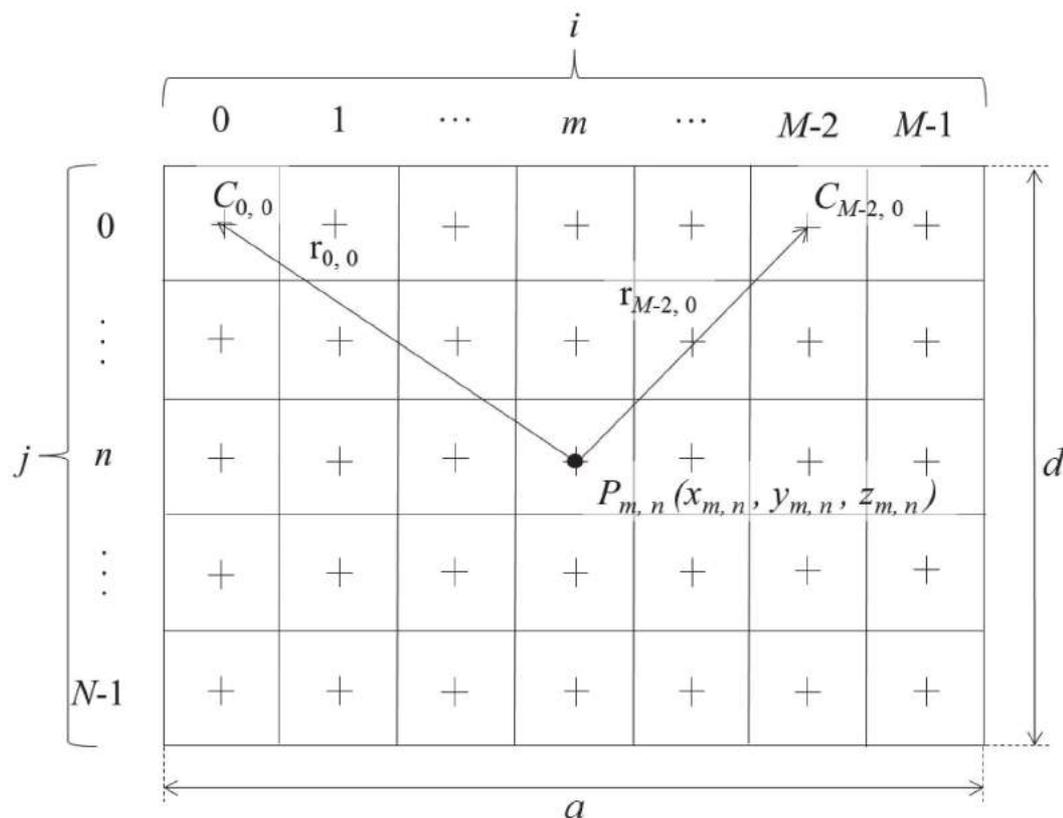


Рис. 2. Пример матрицы ПЗС размером $M \times N$ элементов

$$y = kx + b, z = hx + b. \quad (10)$$

После подготовительного этапа по определению уравнений прямых, в которых лежат трассирующие лучи, осуществляется непосредственно этап трассировки трехмерной ЦММ. Сущность данного этапа сводится к определению координат точек пересечения лучей и треугольных фацетов, описывающих поверхность объекта (местности).

Положение треугольного фацета в пространстве задается с помощью трех вершин и вектора нормали к его поверхности. При поиске точек пересечения фацетов и лучей трассировки может оказаться так, что один луч пересекает несколько фацетов. Считается, что луч пересекает тот фацет, точка пересечения с которым, находится ближе всего к начальной точке (точке S местоположения оптического датчика, рис. 1). Данный фацет считается видимым, т.е. он не затенен другими фацетами.

Исходя из вышесказанного, решение задачи определения точки пересечения трассирующего луча и фацета сводится к последовательному выполнению следующих шагов:

- определение точки пересечения луча трассера с плоскостью, в которой лежит фацет;
- проверка условия попадания точки пересечения внутрь фацета;

- выбор фацета, пересекающегося с лучом трассера в точке, наиболее приближенной к начальной точке (точке испускания луча).

С целью определения освещенности элемента $P_{i,j}$ матрицы ПЗС (рис. 2) из соответствующей точки $P_0(x_{0,i,j}, y_{0,i,j}, z_{0,i,j})$ пересечения трассирующего луча с фацетом по направлению на источник освещения L (рис. 1) задается вторичный стробирующий луч. Для вторичного стробирующего луча аналогичным образом определяется точка пересечения с фацетом элемента трехмерной сцены. Если вторичный луч пересекает какой-либо фацет сцены, то считается, что точка пересечения трассирующего луча с фацетом $P_0(x_{0,i,j}, y_{0,i,j}, z_{0,i,j})$ затенена, а следовательно соответствующий элемент $P_{i,j}$ матрицы ПЗС (пиксель формируемого изображения) будет содержать значение яркости, соответствующее области световой тени. Данному случаю соответствует пример распространения луча «1» на рис. 1. Значения уровней яркости пикселей формируемого оптического изображения, содержащих область тени, рассчитываются с учетом значения угла-места Φ положения источника света L , а также с учетом состояния атмосферы (дождь, туман, облачность и т.д.).

Если же вторичный луч на своем пути не пересекает ни одного фацета сцены, то считается, что точка пересечения трассирующего луча с фацетом $P_0(x_{0,i,j}, y_{0,i,j}, z_{0,i,j})$ является освещенной, а следовательно элемент $P_{i,j}$

матрицы ПЗС (пиксель формируемого изображения) будет содержать значение яркости, соответствующее освещенной области. Данному случаю соответствует пример распространения луча «2» на рис. 1.

В конечном итоге значение яркости каждого пикселя формируемого изображения рассчитывается с учетом яркости соответствующих пикселей текстурного изображения из состава трехмерной ЦММ (попадающих в элемент разрешения), а также условий их освещенности.

В результате трассировки формируется матрица оптического изображения размерностью $N \times M$ для заданных условий наблюдения и освещения, содержащая значения рассчитанных уровней яркости пикселей, соответствующих затененным и освещенным областям трехмерной ЦММ.

Результаты реализации метода формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе трехмерных цифровых моделей местности с текстурным покрытием

Для подтверждения возможностей формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе использования трехмерных ЦММ, содержащих в своем составе текстурные покрытия, было осуществлено апробирование предложенного метода с помощью экспериментального программного модуля (ПМ) формирования прогнозных изображений видимого диапазона.

К основным функциональным возможностям ПМ формирования прогнозных изображений видимого диапазона можно отнести следующие:

- поддержка графического интерфейса пользователя;
- загрузка и визуализация трехмерных ЦММ;
- задание параметров для расчета прогнозных ОЭИ;
- непосредственно расчет прогнозных ОЭИ на основе трехмерных ЦММ для заданных элементов внешнего ориентирования, траектории перемещения и технических характеристик оптико-электронного датчика (масштаба и детальности изображения);
- визуализация рассчитанных прогнозных изображений с обеспечением выполнения необходимых сервисных функций, включая сохранение в базе данных.

Необходимым условием для расчета прогнозного изображения видимого диапазона является наличие загруженной трехмерной ЦММ, содержащей в своем составе:

- рельеф местности;
- маршрут (траекторию) полета воздушного судна;
- текстурное покрытие на основе матрицы планового изображения;
- объекты инфраструктуры и фоновые образования (при наличии).

Также необходимо задать условия наблюдения и параметры функционирования моделируемого оптического датчика [3], а именно:

- тип (наименование) оптического датчика аппаратуры наблюдения;
- значения параметров функционирования оптического датчика;
- координаты точки наблюдения (проецирования);
- направление наблюдения (углы задания пространственного положения оптической оси датчика).

Перечень параметров функционирования оптического датчика при расчете прогнозных изображений в приближении геометрической оптики включает в себя:

- фокусное расстояние оптической системы, м;
- ширину и высоту элемента ПЗС матрицы, м;
- ширину и высоту ПЗС матрицы (количество элементов).

Параметры положения естественного источника освещения (Солнце, Луна) задаются в соответствии с результатами расчета на заданную дату.

Кроме того, имеется возможность задавать (изменять) количество отсчетов (трассирующих лучей), приходящихся на один элемент разрешения (по обеим координатам) формируемого прогнозного ОЭИ. По умолчанию значение данного параметра равно единице. Увеличение количества элементов осреднения обеспечивает повышение точности расчета прогнозных изображений, но приводит к значительному увеличению временных затрат.

Когда все параметры моделируемого датчика заданы, активизируется процесс расчета прогнозного изображения видимого диапазона, которое в дальнейшем визуализируется и при необходимости сохраняется в базе данных.

Пример внешнего вида диалогового окна ПМ формирования прогнозных изображений видимого диапазона представлен на рис. 3.

В качестве одного из тестовых районов для апробирования предложенного метода был выбран участок местности с ярко выраженным рельефом, границы которого представлены на рис. 4.

При расчете прогнозного оптико-электронного изображения с использованием трехмерной ЦММ был выбран тестовый оптический датчик сканерного типа со следующими параметрами:

- фокусное расстояние оптической системы – 0.015 м;
- ширина элемента ПЗС матрицы – 0.00075 м;
- высота элемента ПЗС матрицы – 0.00075 м;
- ширина ПЗС матрицы – 200 элементов;
- высота ПЗС матрицы – 1 элемент.

Моделировались условия наблюдения с высоты 300 м в надир.

Результат формирования прогнозного изображения оптико-электронного датчика сканерного типа при наблюдении земной поверхности с сильно выраженным рельефом с высоты 300 м представлен на рис. 5.

Результаты сравнительного анализа полученного прогнозного изображения видимого диапазона и соответствующего ему исходного детального космического изображения на тот же участок местности (рис. 5) свидетельствуют о том, что использование предложенного метода

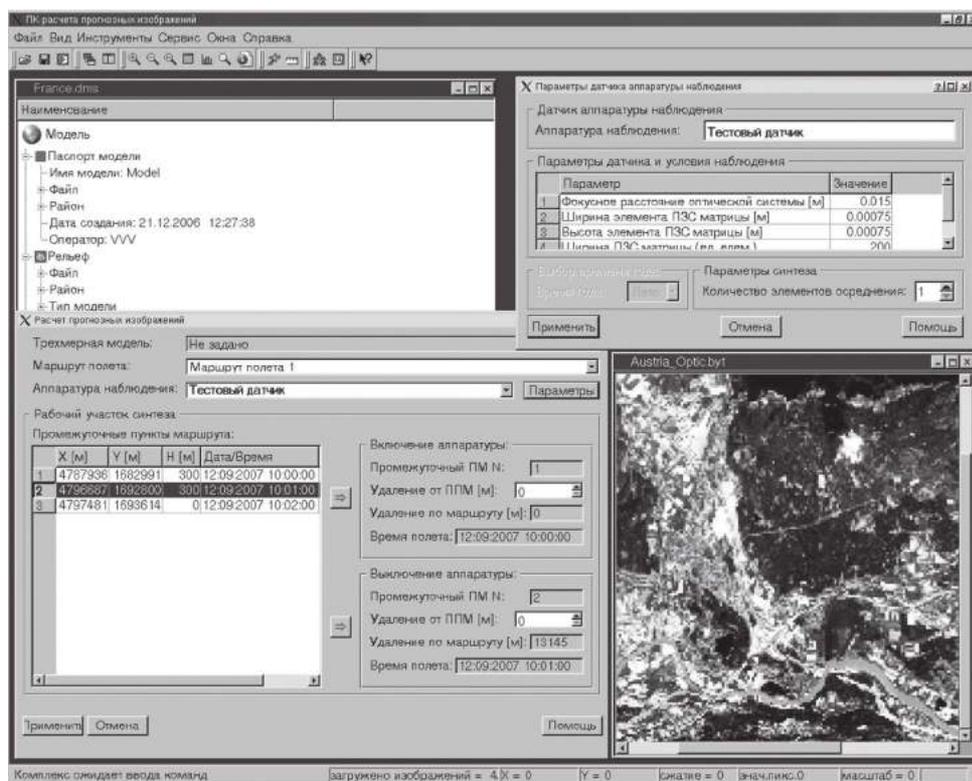


Рис. 3. Пример внешнего вида диалогового окна ПМ формирования прогнозных изображений видимого диапазона

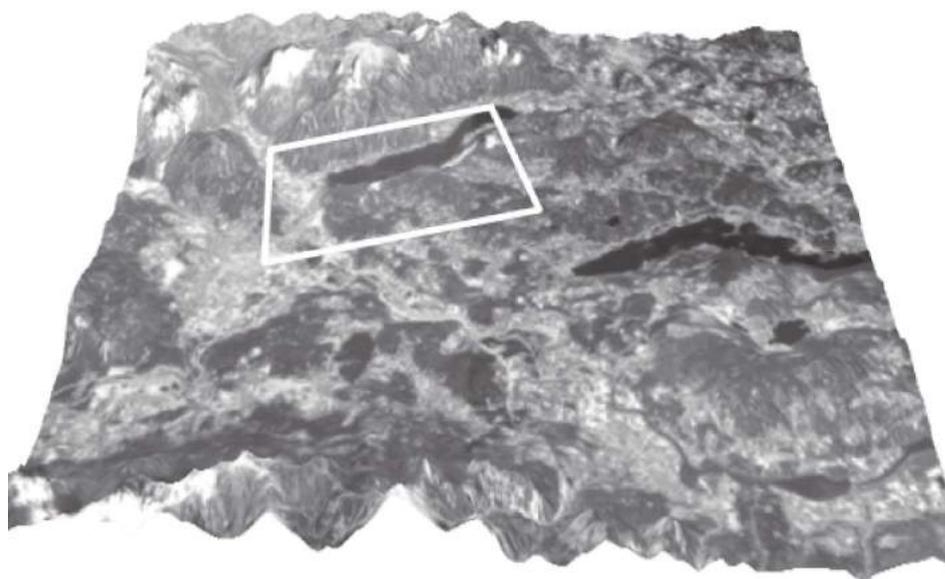


Рис. 4. Пример трехмерной цифровой модели местности с ярко выраженным рельефом и с текстурным покрытием

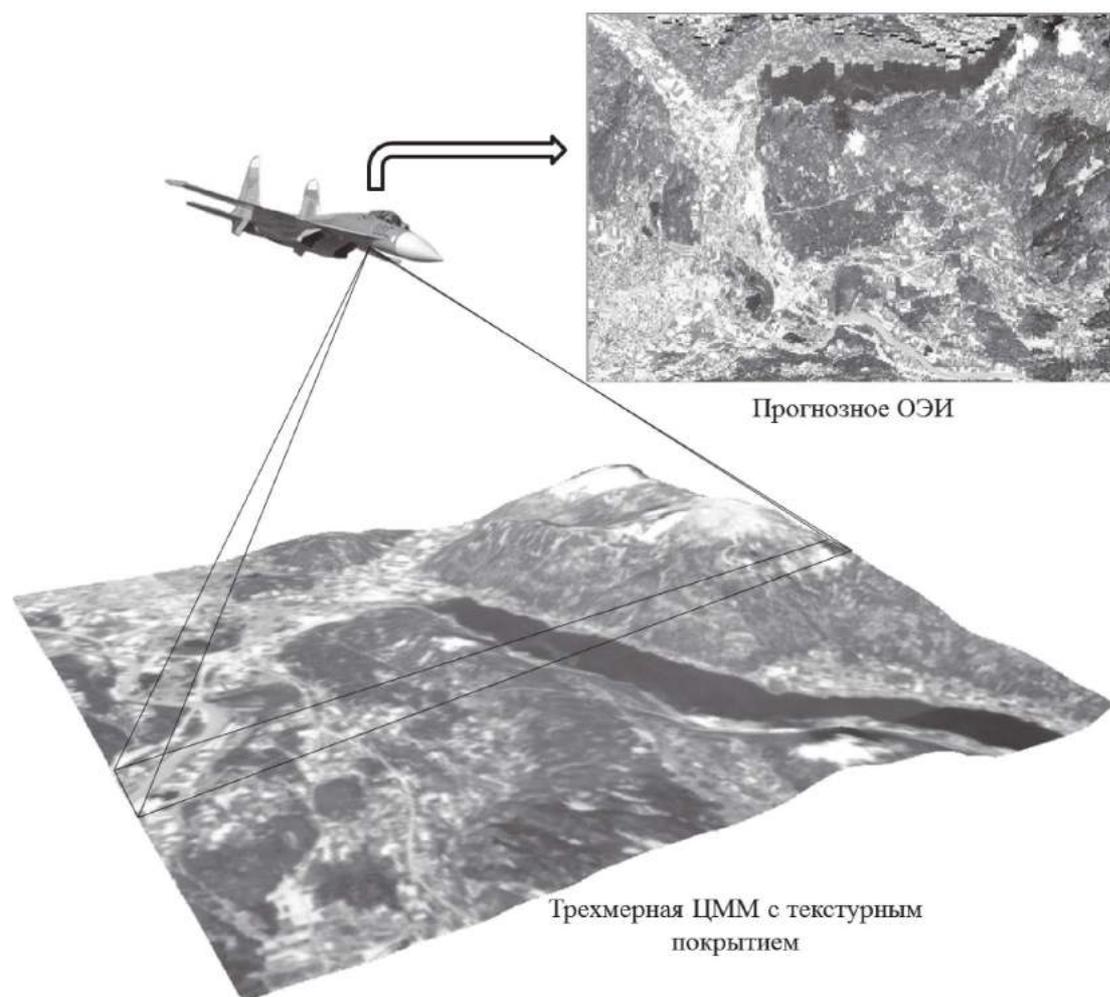


Рис. 5. Результат формирования прогнозного изображения оптико-электронного датчика сканерного типа при наблюдении земной поверхности с сильно выраженным рельефом с высоты 300 м

для формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе использования трехмерных ЦММ обеспечивает учет:

- параметров моделируемого датчика, определяющих детальность (разрешающую способность) и масштаб прогнозного изображения;
- условий дистанционного зондирования (траектория полета, ориентация датчика в пространстве), определяющих местонахождение и размеры зоны захвата датчика на местности, а также его разрешающую способность (в зависимости от высоты полета);
- геофизических условий применения (естественная освещенность, рельеф местности), определяющих значения компонентов цветовой кодировки (RGB) отсчетов яркости, соответствующих освещаемой поверхности объектов в составе трехмерной ЦММ, а также их перераспределение с учетом характеристик рельефа местности (особенно характерно при условии соизмеримости значений перепадов высот местности и высоты съемки);

– текстурных свойств поверхностей объектов и подстилающей поверхности в составе трехмерной сцены.

В конечном итоге корректный учет вышеуказанных характерных особенностей при использовании рассматриваемого метода позволяет обеспечить адекватное формирование прогнозных изображений видимого диапазона на основе трехмерных ЦММ для заданных элементов внешнего ориентирования, траектории перемещения и основных технических характеристик оптико-электронных датчиков, входящих в состав систем и комплексов дистанционного зондирования земной поверхности воздушного базирования.

Заключение

Разработанный метод формирования прогнозных изображений видимого диапазона за счет применения трехмерных ЦММ обеспечивает адекватный переход от изображений в плановой проекции (текстурных покрытий

в составе трехмерных ЦММ), получаемых в основном космическими средствами дистанционного зондирования земной поверхности, к прогнозным оптико-электронным изображениям, при формировании которых учитываются особенности условий наблюдения и параметров функционирования современных оптико-электронных датчиков, а также влияние рельефа местности на перераспределение отсчетов яркости и формирование областей тени на прогнозных изображениях.

Предложенный метод и формируемые на его основе прогнозные изображения видимого диапазона целесообразно использовать для обеспечения воздушных комплексов (средств) дистанционного зондирования земной поверхности, построенных на базе пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, в которых в качестве полезной нагрузки используются оптико-электронные системы технического зрения и соответствующая датчиковая аппаратура. К перспективным направлениям применения таких прогнозных изображений видимого диапазона можно отнести следующие:

- предполетный тренаж и обучение экипажей (операторов) воздушных комплексов мониторинга и дистанционного зондирования земной поверхности [4];
- обоснование тактико-технических требований к создаваемым перспективным образцам оптико-электронной датчиковой аппаратуры и подтверждение возможности их технической реализуемости с достижением заданных требований по качеству получаемых данных;
- обеспечение проведения испытаний и опытной эксплуатации экспериментальных образцов оптических датчиков в составе комплексов дистанционного зондирования земной поверхности путем формирования репрезентативной выборки необходимых наборов тестовых данных;
- обеспечение выполнения процедур планирования применения комплексов мониторинга воздушного базирования с использованием прогнозных изображений (выбор оптимального маршрута и высоты полета воздушного судна, задание циклограммы функционирования оптических датчиков, оценка информативности местности и т.п.).

Литература

1. Применение цифровых моделей местности в задачах информационного обеспечения аэрокосмических систем / И.А. Бырков [и др.] // Наука и технологии в промышленности. – 2006. – № 2. – С. 48–51.
2. Никулин, Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики / Е.А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 576 с.
3. Теория и практика цифровой обработки изображений. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / под ред. А.М. Берлянта. – М.: Научный мир, 2003. – 168 с.
4. Бырков, И. А. Пространственно-энергетические модели местности в задачах предполетной подготовки экипажей летательных аппаратов / И.А. Бырков, Е.Э. Филиппских // Мир авионики. – 2003. – № 2. – С. 40–41.

Геоинформационные объектно-ориентированные модели формирования образного мышления

Object-oriented GIS models for visual thinking

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

Гоманов / Gomanov D.

Денис Евгеньевич

(go506@ya.ru)

кандидат технических наук.

председатель научно-технического комитета

Топографической службы ВС РФ.

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»,

заведующий кафедрой ГИС.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: геоинформатика – geomatics; геоинформационное обеспечение систем управления – geoinformation applications of control systems; образное мышление – visual thinking; объектно-ориентированные модели местности – object-oriented terrain models; концептуальная модель – conceptual model.

Рассмотрена специфика геоинформационного обеспечения современных систем поддержки принятия решений. Предложенные объектно-ориентированные модели местности для формирования образного мышления использованы в современных системах генерализации мультимасштабных электронных геопространственных данных. Предложены модели мультимасштабных электронных карт местности для формирования образного мышления.

Specific features of geoinformation applications for modern decision-making support systems have been reviewed. Proposed object-oriented terrain models obtained using modern systems for compilation of multi-scale electronic geospatial data.

В настоящее время обеспечить полноценную деятельность любого ведомства в различных условиях обстановки невозможно без геоинформационного обеспечения, создающего модель единого геоинформационного пространства.

Внедрение новых технологий, удовлетворяющих современным требованиям, позволит решить эту задачу.

Сложившаяся геоинформационная реальность состоит не только в потребности геопространственной информации каждому должностному лицу и органам всех уровней управления, но и в оперативности геоинформационного обеспечения, стремящегося к предоставлению точной и актуальной информации в реальном масштабе времени [1].

Предъявление жёстких требований к оперативности в условиях, когда выработка вариантов решений в системах поддержки осуществляется в реальном масштабе времени с адекватным восприятием ситуации, обуславливает использование экспертных систем формирования и накопления знаний.

В условиях активного использования пространственных данных в системах управления различного уровня и предназначения формирование образного мышления у лиц, принимающих решения, становится актуальной задачей [2, 5, 6].

Особенность состоит в том, что объёмы данных, адекватно описывающих реальный мир, весьма велики. Поэтому формирование знаний из этих данных является сложнейшей задачей геоинформационного обеспечения [7].

В контексте статьи под знаниями следует понимать образное отражение окружающей действительности в сознании человека или в интеллектуальной автоматизированной геоинформационной системе [2].

Характерными чертами образного мышления являются:

- единство и участие всех заинтересованных сторон процесса принятия решений для обеспечения сбалансированности образного совместного мышления;
- гибкость, точность и непрерывность, обуславливающие необходимость повышения уровня автоматизации геоинформационного обеспечения и его интеллектуализации.

Таким образом, основными требованиями к геоинформационному обеспечению формирования образного мышления являются:

1. Образное представление геопространственных данных для каждого должностного лица, принимающего решения, в органах управления всех уровней.
2. Объектное представление реального мира.
3. Точность представления пространственных объектов реального мира и система знаний о них.
4. Актуализация пространственных данных в оперативном режиме.
5. Образное моделирование в различных масштабах времени, в том числе близком к реальному.
6. Оперативная ситуационная настройка процесса геоинформационного обеспечения.

Специфика геоинформационного обеспечения современных систем поддержки принятия решений, направленного на формирование образного мышления, состоит в необходимости своевременного создания:

- моделей объектно-ориентированных пространственных данных;
- баз объектно-ориентированных пространственных данных;
- сетевого обеспечения актуализации объектно-ориентированных пространственных данных;
- электронных 2D, 3D и 4D карт нового поколения;
- технологии генерализации объектно-ориентированных пространственных данных в 2D, 3D и 4D представлении на электронных картах нового поколения;
- объектно-ориентированных сервисов формирования образного мышления и баз знаний;
- сетевого защищённого геоинформационного обеспечения формирования образного мышления.

Преимуществами объектно-ориентированного подхода к формированию образного мышления являются:

1. Высокое качество описания свойств местности, формирующих образ для восприятия человеком.
2. Высокая оперативность создания объектно-ориентированных баз пространственных данных с требуемым уровнем точности.
3. Простота и удобство создания интеллектуальных геоинформационных систем для формирования образного мышления.
4. Высокий уровень унификации.
5. Создание распределённых баз знаний об объективной реальности в физическом мире.



Рис. 1. Концептуальная модель геоинформационного обеспечения



Рис. 2. Формирование образов в геоинформационном пространстве



Рис. 3. Мультимасштабное формирование образов

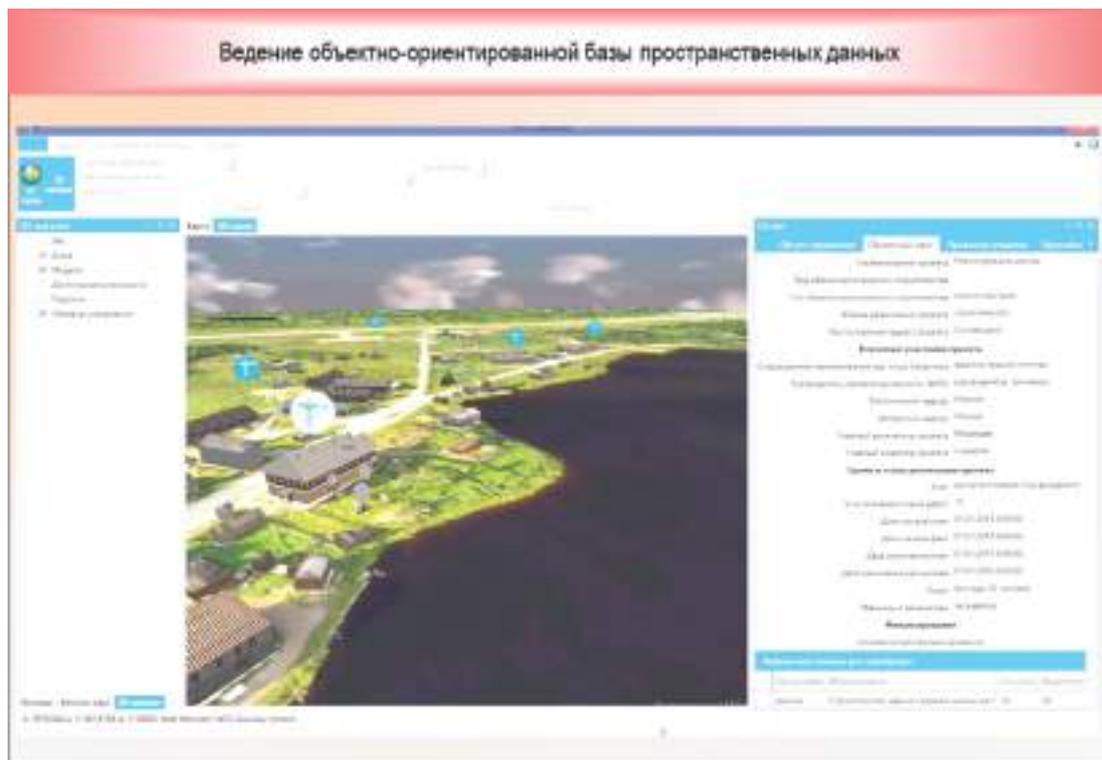


Рис. 4. Ведение объектно-ориентированной базы пространственных данных



Рис. 5. Ситуационный центр управления различного назначения



Рис. 6. Применение в сложных тренажёрных комплексах и системах

6. Существенное повышение качества принимаемых решений.

Концептуальная модель геоинформационного обеспечения формирования образного мышления представлена на рис. 1.

Возможности нового геоинформационного обеспечения образного мышления реализуются с использованием объектно-ориентированной базы пространственных данных и сервиса мультимасштабного формирования образов физической реальности в 2D, 3D, 4D информационном пространстве.

Пример формирования образов в геоинформационном пространстве представлен на рис. 2 [4].

Мультимасштабное формирование образов представлено на рис. 3.

Пример ведения объектно-ориентированной базы пространственных данных представлен на рис. 4.

Каждый объект базы данных рассматривается как отдельная сущность с возможностью его моделирования в разные периоды времени.

В современных условиях объектно-ориентированный подход формирования образного мышления широко применяется в ситуационных центрах управления различного назначения (рис. 5) [3].

Объектно-ориентированная модель формирования образного мышления применяется при геоаналитическом моделировании взаимодействия различных ведомств.

Данный подход нашёл широкое применение в

сложных тренажёрных комплексах и системах (рис 6).

На данном рисунке показана высокоточная цифровая пространственная модель местности полигона подготовки водителей сложных инженерных комплексов. Она позволяет сформировать образное мышление у водителей вышеуказанных инженерных комплексов в 4D-формате представления пространственных данных.

Таким образом, геоинформационное обеспечение формирования образного мышления позволяет достигнуть синергетического эффекта созданных и создаваемых геоинформационных технологий и систем, обеспечивает создание единого геоинформационного пространства систем управления, существенно повышает эффективность процессов управления в современных автоматизированных системах.

Литература.

1. Зализнюк, А. Н. Стратегическое планирование геоинформационного обеспечения систем управления / А.Н. Зализнюк, С.П. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2016. – № 4. – С. 130–132.
2. Лурье, И. К. Основы геоинформатики и создание ГИС. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Ч. 1 / И.К. Лурье ; под ред. А.М. Берлянта. – М.: ИНЕКС-92, 2002. – 140 с.
3. Пат. № 2571784 Российская Федерация, МПК G06F 17/00. Интерактивный геоинформационный комплекс / С.П. Присяжнюк, Д.В. Карманов, А.С. Присяжнюк ; патен-

тообладатель ЗАО «Институт телекоммуникаций» ;
№ 2014133010/03; заявл. 12.08.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл.
№ 35.

4. Присяжнюк, С. П. Геоинформационная система поддержки
и принятия решений и управления Соловецким архипелагом /
С.П. Присяжнюк, И.А. Иванов, Д.В. Карманов // Информа-
ция и Космос. – 2014. – № 4. – С. 86–93.

5. Осуга, С. Обработка знаний [: пер. с япон.] / С. Осуга. –
М.: Мир, 1989. – 293 с.

6. Нейлор, К. Как построить свою экспертную систему
[: пер. с англ.] / К. Нейлор – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 286 с.

7. Основы геоинформатики: В 2 кн. Кн. 1 / Под редак-
цией В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия»,
2004. – 352 с.

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

* В соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25.02.2009 № 59 (в ред. Приказов Минобрнауки РФ от 11.06.2009 N 294, от 10.01.2012 N 5)

О проектировании оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Design of optoelectronic equipment for the Earth remote sensing spacecraft

Свиридов / Sviridov K.

Константин Николаевич
(sviridovkn@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор,
заслуженный изобретатель РФ.

АО «Российские космические системы»,
главный научный сотрудник.
г. Москва

Тюлин / Tyulin A.

Андрей Евгеньевич
(tyulin@spacecorp.ru)

доктор экономических наук,
член-корреспондент РАН.

АО «Российские космические системы»,
генеральный директор.
г. Москва

Ключевые слова: объектив и детектор – lens and detector; критерий Найквиста – Nyquist criterion; оценки предельного инструментального разрешения – evaluation of limit instrumental resolution; проектирование оптико-электронной аппаратуры – design of optoelectronic equipment.

Рассматриваются два подхода к проектированию оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), основанные на двух разных критериях оценки предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) на местности. Первый подход к проектированию ОЭА КА ДЗЗ использует известный критерий оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности GSD, основанный на проекции одного пикселя цифрового детектора на зондируемую земную поверхность. Критерий GSD дает оптимистичную, но ошибочную оценку предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, а главное, его использование при проектировании ОЭА КА ДЗЗ имеет ограниченное применение, так как не позволяет согласовать объектив и цифровой детектор по критерию Найквиста для обеспечения возможности достижения дифракционного предела разрешения КА ДЗЗ на местности. Новый критерий, предложенный в РКС, основан на формировании проекции периода дискретизации (двух пикселей) цифрового детектора на зондируемую земную поверхность. Этот критерий, в отличие от GSD, позволяет при проектировании ОЭА КА ДЗЗ добиться максимального совершенства проектируемой ОЭА, а именно, согласовать объектив и детектор по критерию Найквиста и обеспечить достижение дифракционного разрешения КА ДЗЗ на местности.

Two approaches to the design of optoelectronic equipment (OEE) are considered. Both of them are based on two different criteria of estimating limit instrumental resolution for Earth remote sensing spacecraft (ERSS) in the terrain. The first approach to the design of ERSS OEE is focused on well-known criterion for estimating limit instrumental resolution of the Earth remote sensing spacecraft in GSD terrain based on digital detector one pixel projection to sensing Earth surface. The GSD criterion gives an optimistic, but erroneous estimate of ERSS limit instrumental resolution in the terrain, and moreover, its application in designing ERSS OEE is limited since it does not offer the possibility to match the lens and digital detector by Nyquist criterion in order to achieve ERSS diffraction limit of resolution in the terrain. New criterion proposed in Space and Missile System is based on producing projection of digital detector sampling period (of two pixels) on the sensing surface of the Earth. This criterion, in contrast to GSD, makes possible to achieve maximum perfection of the designed OEE in ERSS OEE engineering, i.e. to match the lens and digital detector by Nyquist criterion and to achieve ERSS diffraction limit of resolution in the terrain.

Введение

Оптико-электронная аппаратура КА ДЗЗ включает: оптический объектив с диаметром апертуры – D {м} и фокусным расстоянием – F {м}, а также цифровой детектор с пространственным элементом разрешения (пикселем) – d {мкм} (рис. 1). Совершенное проектирование ОЭА КА ДЗЗ подразумевает определение величин D , F и d , обеспечивающих согласование объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста для достижения дифракционного предела разрешения КА ДЗЗ на местности [1].

Известно, что наиболее информативным и востребованным потребителями продуктом ДЗЗ является оптическое изображение зондируемого участка земной поверхности. Существуют различные критерии оценки качества оптических изображений, однако не многие из них пригодны для оценки эффективности наблюдательных оптических систем и, в частности, систем ДЗЗ. Проведенные исследования [2] свидетельствуют о том, что наиболее универсальным критерием, характеризующим как качество изображения объекта, так

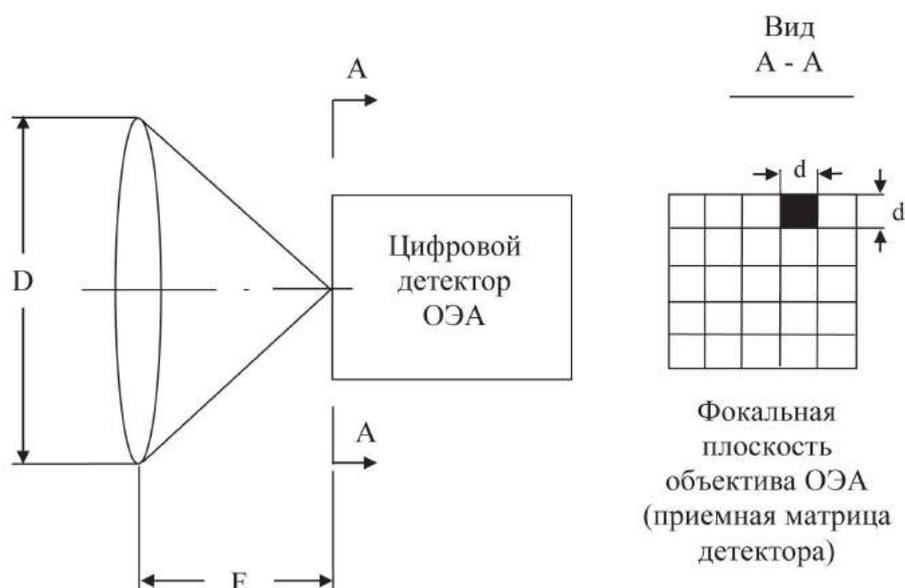


Рис. 1. Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ)

и эффективность системы его наблюдения, является разрешающая способность. Предельная величина инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности зависит от степени согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста и может изменяться от некоторого реального значения инструментального предела разрешения КА ДЗЗ на местности до величины максимального (дифракционного) предела разрешения. От выбора критерия оценки разрешения зависит как правильность определения реального предельного разрешения КА ДЗЗ на местности в процессе наблюдения, так и возможность согласования ОЭА по критерию Найквиста в процессе ее проектирования.

Рассмотрим существующие критерии оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности и основанные на их использовании подходы к проектированию ОЭА КА ДЗЗ.

Известный критерий оценки предельного инструментального разрешения

С появлением цифровых детекторов появились новые критерии оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности. Сегодня в качестве основного критерия оценки предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности используют проекцию одного пикселя цифрового детектора d на зондируемую земную поверхность [3]. Этот предел пространственного разрешения на местности определяется соотношением

$$R_{дн/F} = dH / F \quad \{м\} \quad (1)$$

Критерий (1) оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности был принят в практике ДЗЗ с появлением цифровых детекторов: сначала за рубежом, где он был назван GSD [4], а впоследствии он был принят и в российской практике ДЗЗ [5]. Недостатком GSD является то, что он дает оптимистичную, но ошибочную оценку разрешения, ведущую к ограничениям проектирования. Эксперименты по оценке предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности в оптическом и радио диапазонах длин волн свидетельствуют о том, что в действительности размер проекции пикселя на Землю (GSD) всегда меньше реального линейного разрешения данных ДЗЗ на местности [6]. В настоящее время, однако, вопреки результатам многочисленных экспериментов, в качестве оценки предельной величины разрешающей способности цифровых систем ДЗЗ на местности используют проекцию одного пикселя детектора на зондируемую земную поверхность GSD (1), то есть на практике имеет место неоправданное отождествление понятий линейной разрешающей способности на местности и размера проекции пикселя на Землю. Существует мнение [6], что «...такой подход к оценке разрешения КА ДЗЗ на местности используется для преднамеренного завышения декларируемых технических характеристик средств ДЗЗ по сравнению с их реальными показателями, чтобы повысить коммерческую конкурентоспособность и привлекательность продуктов ДЗЗ на потребительском рынке». Это несоответствие оценок

критерия GSD (1) результатам экспериментов стимулировало нас на проведение дополнительных исследований.

Новый критерий оценки предельного инструментального разрешения

Известно [7], что определение линейного разрешения аналоговых фотоизображений по штриховым мирам в отечественной и зарубежной практике отличаются на уровне стандартов: ГОСТ и ISO. Действительно, российский стандарт в соответствии с ГОСТ [8, 9] устанавливает, что линейное разрешение в изображении $R_{лри}$ определяется периодом штриховой миры, то есть суммой светлой и темной линий $R_{лри} = 2p$, где p – размер светлой или темной линии – минимального разрешаемого элемента штриховой миры. При этом линейное разрешение на местности $R_{лрм}$ аналогового изображения ДЗЗ определяется проекцией линейного разрешения в изображении $R_{лри} = 2p$ на зондируемую земную поверхность [10], как

$$R_{лрм} = R_{лри} H / F = 2pH / F \quad \{м\} \quad (2)$$

В случаях формирования цифровых изображений размер минимального разрешаемого элемента в изображении p равен размеру пикселя d цифрового детектора. При этом формула линейного разрешения на местности (2) преобразуется к виду

$$R_{лрм} = 2dH / F = R_{2dH/F} \quad \{м\} \quad (3)$$

Получено выражение для оценки линейного разрешения КА ДЗЗ на местности, как проекции периода дискретизации цифрового детектора $2d$ на зондируемую земную поверхность $R_{2dH/F}$, а это и есть новый критерий оценки предельного разрешения КА ДЗЗ на местности, интуитивно предложенный в АО «Российские космические системы» ранее [1] (далее критерий РКС).

Здесь этот критерий (3) получен аналитически на основании того, что период дискретизации (два пикселя) детектора, как и его проекция на зондируемую земную поверхность, для цифровых изображений ДЗЗ эквивалентен периоду (сумме светлой и темной линий) штриховой миры, используемой при определении линейного разрешения на местности для аналоговых фотоизображений ДЗЗ в соответствии с действующими российскими стандартами оценки разрешения [9, 10].

На основании этого очевидно, что один пиксель d в цифровом изображении, как и его проекция на зондируемую земную поверхность (GSD), соответствуют половине периода штриховой миры аналогового изображения, то есть GSD эквивалентен одной (светлой или темной) линии штриховой миры и не может оценивать разрешение в соответствии с российским ГОСТ. За рубежом введение в практику ДЗЗ критерия GSD было связано, по видимому, с зарубежными стандар-

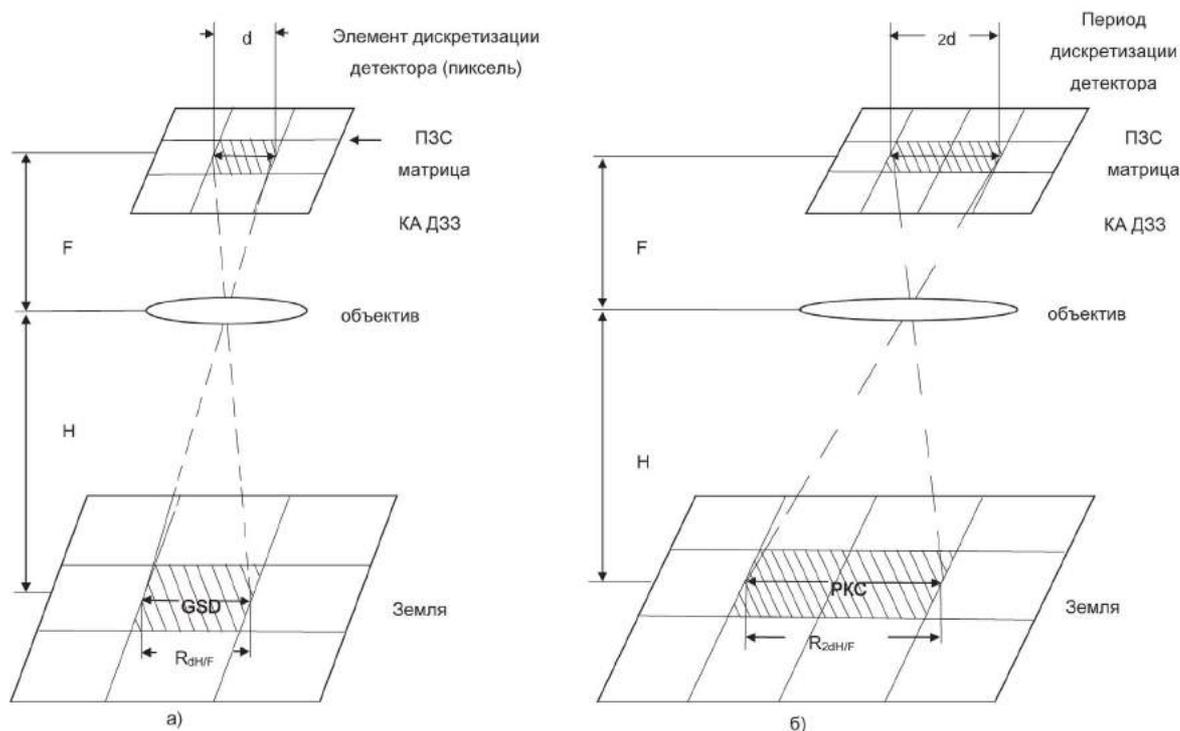


Рис. 2. Оценка предельного инструментального разрешения ОЭА КА ДЗЗ на местности: а) GSD, б) РКС

тами разрешения, в соответствии с которыми за величину линейного разрешения в фокальной плоскости изображений, как и на местности, принимается одна линия (светлая или темная) штриховой пары. Это отмечалось в работе [8], что «...в стандартизованном для видео и цифровой фототехники зарубежном (см., например, ISO 12231, ISO 12233) термине «пара линий» за «линию» считается также и промежуток между штрихами пары, что физически неверно, так как в таком случае пространственная частота получается обратной полупериоду пары...». Это качественно свидетельствует об ошибочности критерия GSD и основанного на нем проектирования ОЭА КА ДЗЗ. Количественное подтверждение будет дано ниже. На рис. 2 дана иллюстрация рассматриваемых критериев оценки GSD и РКС.

Критерий Найквиста согласования ОЭА и коэффициент совершенства ОЭА

Наряду с рассмотренными критериями оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, существует дифракционный предел разрешения объектива, который определяет потенциальные возможности ОЭА по достижению максимального пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности в соответствии с известной формулой [2]

$$R_{\lambda H/D} = \lambda H / D \quad \{м\} \quad (4)$$

Следует заметить, что дифракционный предел разрешения (4) может быть достигнут только при согласовании объектива и детектора по критерию Найквиста [2], когда на дифракционный элемент разрешения объектива в изображении (диск Эри) $\lambda F/D$ приходится, как минимум два элемента разрешения (пикселя) $2d$ цифрового детектора.

Для оценки степени согласования объектива и детектора проектируемой ОЭА по критерию Найквиста нами введено понятие коэффициента совершенства ОЭА КА ДЗЗ [11], как отношение оценки предельного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{2dH/F}$ к дифракционному пределу разрешения $R_{\lambda H/D}$ КА ДЗЗ на местности

$$K = R_{2dH/F} / R_{\lambda H/D} = 2dD / \lambda F, \quad (5)$$

где $K \geq 1$.

В согласованной по критерию Найквиста проектируемой ОЭА коэффициент совершенства аппаратуры равен единице ($K=1$) и при этом из формулы (5) следует, что

$$\lambda F / D = 2d, \quad (6)$$

а это и есть упомянутое выше условие согласования объектива и детектора ОЭА по критерию Найквиста.

Полученный результат (6) свидетельствует о том, что предложенный в РКС критерий оценки $R_{2dH/F}$ позволяет

согласовать проектируемую ОЭА по критерию Найквиста и обеспечить возможность достижения дифракционного предела разрешения КА ДЗЗ на местности.

Для сравнения результатов проектирования рассмотрим коэффициент совершенства аппаратуры, обозначим его K_0 , вводимый отношением предела GSD (1) к дифракционному пределу разрешения КА ДЗЗ на местности $\lambda H/D$ (4)

$$K_0 = (dH / F) / (\lambda H / D) = dD / \lambda F, \quad (7)$$

где $K_0 \geq 1$.

Ситуация, когда $K_0=1$, представляет границу применимости критерия GSD для оценки разрешения систем ДЗЗ на местности, когда $dH/F=\lambda H/D$, так как ситуация, когда GSD становится меньше дифракционного предела ($K_0 < 1$), противоречит физическому смыслу.

Из сравнения (5) и (7) следует, что

$$K=2K_0, \quad (8)$$

и ограничение, устанавливаемое критерием GSD на величину K_0 , а именно, $K_0 \geq 1$, накладывает ограничение и на коэффициент совершенства K (5)

$$K \geq 2 \quad (9)$$

Полученное ограничение (9) на совершенство проектируемой ОЭА, обусловленное использованием критерия GSD, подтверждается существующими значениями коэффициентов совершенства ОЭА, большими двух ($K > 2$), для всех зарубежных КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения, представленных в таблице 1 [11] и спроектированных с использованием критерия GSD. На основании проведенных исследований и данных таблицы 1 очевидно, что, используя критерий GSD для оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, нельзя при проектировании ОЭА достичь коэффициента совершенства аппаратуры, равного единице ($K=1$), то есть нельзя согласовать ОЭА по критерию Найквиста и достичь дифракционного предела разрешения КА ДЗЗ на местности.

Проектирование оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) КА ДЗЗ

В подтверждение сказанного рассмотрим два подхода к проектированию ОЭА КА ДЗЗ:

Подход I, опираясь на критерий оценки предела инструментального разрешения GSD ($R_{dH/F}$):

Подход II, опираясь на критерий оценки предела инструментального разрешения РКС ($R_{2dH/F}$).

Подход I

Проектируя ОЭА КА ДЗЗ, опираясь на критерий GSD, выполняют следующую последовательность операций:

1) получают паспортные данные для КА ДЗЗ такие как: требуемое линейное разрешение КА ДЗЗ на местности $R_{ЛРМ}=1$ м, среднюю высоту КА ДЗЗ над зондиру-

Таблица 1

**Коэффициент совершенства проектируемой ОЭА КА ДЗЗ
K при использовании критерия GSD, (K>2)**

№ п/п	Наименование КА ДЗЗ ($\lambda = 0,55$ мкм)	Параметр			
		Диаметр объектива D [м]	Фокус объектива F [м]	Пиксель детектора d [мкм]	Коэффициент совершенства K
1	IKONOS-2	0,7	10	12	3,0
2	QuikBird-2	0,6	8,8	12	2,95
3	OrbView-3	0,45	3,0	6	3,29
4	EROS-B	0,5	5,0	7	2,56
5	Cartosat-2	0,7	5,6	7	3,2
6	WorldView-1	0,6	8,8	8	2,32
7	GeoEye-1	1,1	13,3	8	2,4
8	WorldView-2	1,1	13,3	8	2,4
9	Pleiades-1	0,65	12,9	13	2,39
10	WorldView-3	1,1	13,3	6,7	2,01

емой земной поверхностью $H=500$ км и среднюю длину волны солнечного излучения подсвета земной поверхности $\lambda=0,6$ мкм ;

2) выбирают реально существующий цифровой детектор ОЭА с размером элемента разрешения (пикселя) d , равным, например, $d=6$ мкм;

3) определяют исходные данные для проектирования ОЭА такие как: $R_{ЛРМ}, d, H$ и λ ;

4) формируют оценку предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{дн/Ф}$ (GSD), равной требуемому линейному разрешению КА ДЗЗ на местности $R_{ЛРМ}=1$ м;

5) определяют дифракционное разрешение КА ДЗЗ на местности $R_{\lambda/D}$, равным требуемому линейному разрешению КА ДЗЗ на местности $R_{ЛРМ}$

$$R_{\lambda/D} = R_{ЛРМ} = 1 \text{ м} \tag{10}$$

6) на основании равенства (10) определяют требуемый диаметр апертуры объектива ОЭА, как

$$D = \lambda H / R_{ЛРМ} \quad \{м\} \tag{11}$$

а, подставляя паспортные данные п.1) $\lambda=0,6$ мкм, $H=500$ км, $R_{ЛРМ}=1$ м, получают $D=0,3$ м;

7) формируют коэффициент совершенства проектируемой ОЭА КА ДЗЗ, как

$$K_0 = R_{дн/Ф} / R_{\lambda/D} = dD / \lambda F, \tag{12}$$

где $K_0 \geq 1$;

8) устанавливая требуемый коэффициент качества проектируемой аппаратуры K_0 , равным единице, {так как 4)=5)}

$$K_0 = dD / \lambda F = 1, \quad (13)$$

на основании формулы (13) определяют требуемое фокусное расстояние проектируемой ОЭА, как

$$F = dD / \lambda \quad \{м\} \quad (14)$$

а, подставляя значения величин $d=6$ мкм, $D=0,3$ м, $\lambda=0,6$ мкм, получают $F=3$ м.

9) из условия (13), когда $K_0=1$, следует, что

$$\lambda F / D = d \quad \{м\} \quad (15)$$

то есть, при этом на дифракционный элемент разрешения объектива (диск Эри) $\lambda F/D$ приходится один элемент разрешения (пиксель) d цифрового детектора в изображении. Соотношение (15) свидетельствует о том, что использование критерия GSD ($R_{dH/F}$) не позволяет согласовать ОЭА КА ДЗЗ по критерию Найквиста.

Рассмотрим негативные последствия этого согласования.

При цифровом детектировании сигналов вводится [2] понятие частоты Найквиста $f_N = f_{1/d}/2$, равной половине частоты дискретизации $f_{1/d} = 1/d$, и утверждается, что при дискретизации аналогового сигнала полезную информацию несут только частоты f , которые ниже частоты Найквиста ($f < f_N$).

В мировой научно-технической литературе эта теорема отсчетов (выборки) носит название теоремы Найквиста-Шеннона (в России – теоремы Котельникова), которая гласит, что, если аналоговый сигнал имеет спектр, ограниченный частотой f_{\max} , то он может быть однозначно и без потерь восстановлен по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой $f_{1/d} \geq 2f_{\max}$, где $f_{\max} = f_N$ – верхняя частота в спектре (временном или пространственном).

При полученном (14) фокусном расстоянии объектива, равном $F=3$ м, и пространственном элементе разрешения (пикселе) выбранного детектора, равном $d=6$ мкм ($f_{1/d}=166$ лин/мм), максимальная пространственная частота объектива, передаваемая детектором (частота Найквиста), определяется как

$$f_{D_3/\lambda F} = f_N = f_{1/d} / 2 \quad (16)$$

и равна $f_{D_3/\lambda F} = 83$ лин/мм.

Пространственная частота (16) при $\lambda=0,6$ мкм и $F=3$ м соответствует эквивалентному диаметру апертуры объектива D_3 , определяемому как

$$D_3 = f_{D_3/\lambda F} \lambda F \quad \{м\} \quad (17)$$

и равному $D_3=0,15$ м.

Оценим, какое предельное инструментальное разрешение на Земле с высоты $H=500$ км может быть достигнуто этим эквивалентным диаметром апертуры объектива, равным $D_3=0,15$ м.

В соответствии с (4) при $\lambda=0,6$ мкм имеем

$$R_{\lambda H/D_3} = \lambda H / D_3 = 2 \text{ м} \quad (18)$$

Легко видеть, что эта величина (18), полученная с учетом информационного критерия Найквиста, в два раза превышает оценочное разрешение (1) $R_{dH/F} = 1$ м, полученное проекцией одного пикселя детектора на зондируемую земную поверхность (GSD). Это свидетельствует о том, что с учетом критерия Найквиста реальное инструментальное разрешение систем ДЗЗ на местности необходимо оценивать не одним пикселем (его проекцией на Землю – GSD), а проекцией на зондируемую земную поверхность периода дискретизации, состоящего из двух пикселей,

$$R_{2dH/F} = 2dH / F \quad (19)$$

Мы упоминали этот критерий оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, как критерий РКС [1], и ниже (в п. II) рассмотрим проектирование ОЭА на его основе.

Последовательность операций 1) ÷ 9) проектирования ОЭА, опираясь на критерий GSD, представлена на рис. 3.

Подход II

Рассмотрим последовательность операций проектирования ОЭА КА ДЗЗ, на базе критерия РКС, основанного на оценке предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности проекцией периода дискретизации цифрового детектора $2d$ на зондируемую земную поверхность $R_{2dH/F}$. Этот критерий, предложенный интуитивно в работе [1], дает менее оптимистичные, чем GSD, но достоверные результаты оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности.

Рассмотрим предлагаемую здесь последовательность операций проектирования ОЭА КА ДЗЗ, опираясь на критерий РКС ($R_{2dH/F}$):

10) как и в рассмотренном подходе I, получают паспортные данные для КА ДЗЗ, такие, как: $R_{\text{ЛРМ}} = 1$ м, $H=500$ км, $\lambda=0,6$ мкм;

11) выбирают цифровой детектор, например, как и в первом случае, с размером пространственного элемента разрешения (пикселем), равным $d=6$ мкм;

12) определяют исходные данные для проектирования ОЭА КА ДЗЗ, такие как $R_{\text{ЛРМ}}$, d , H и λ ;

13) формируют проекцию периода дискретизации цифрового детектора $2d$ на зондируемую земную поверхность $R_{2dH/F}$;

14) приравнивают сформированную оценку $R_{2dH/F}$ к требуемому линейному разрешению КА ДЗЗ на местности

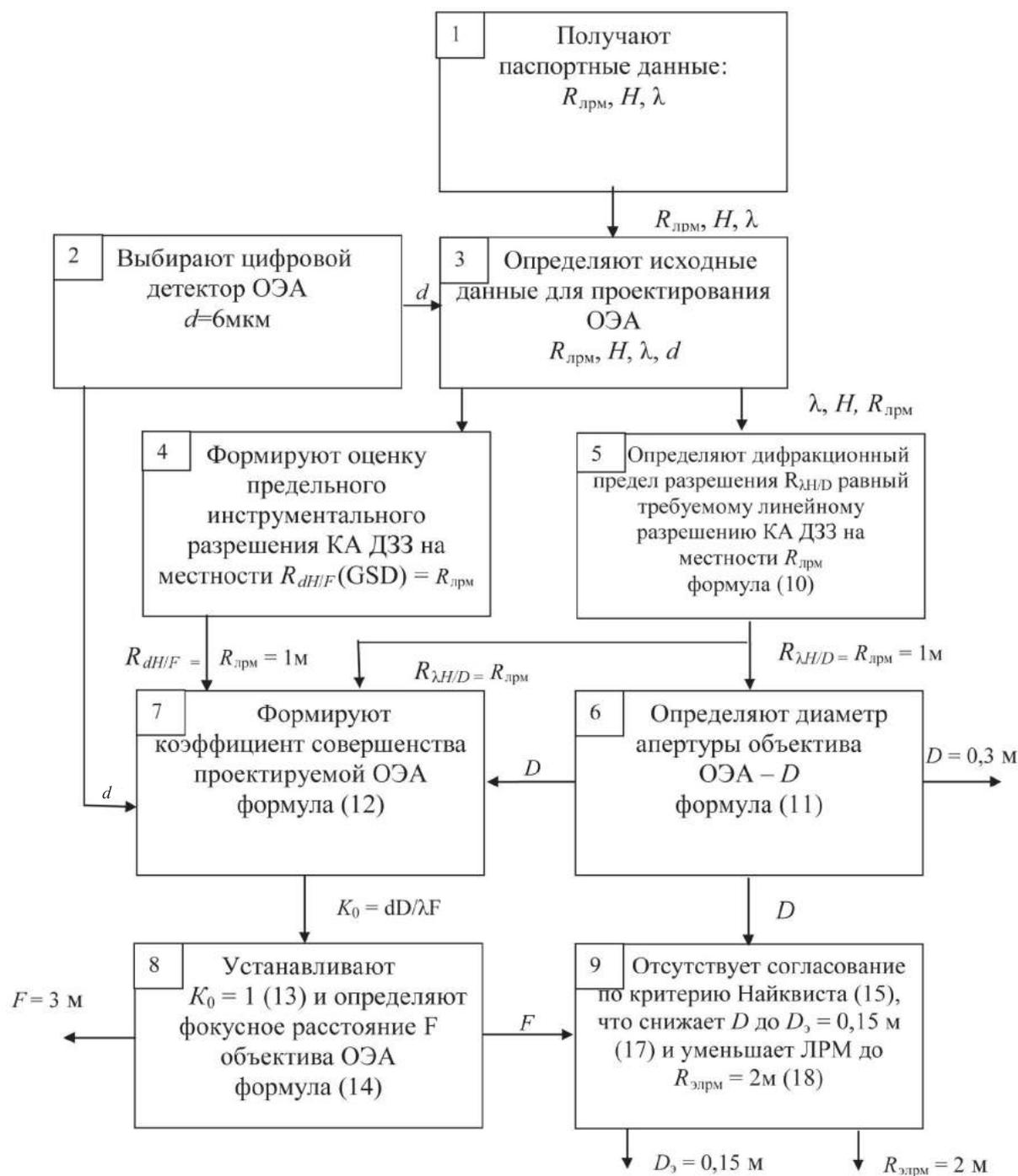


Рис. 3 Блок-схема реализации процесса проектирования ОЭА КА ДЗЗ, используя критерий оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности – GSD ($R_{dH/F}$)

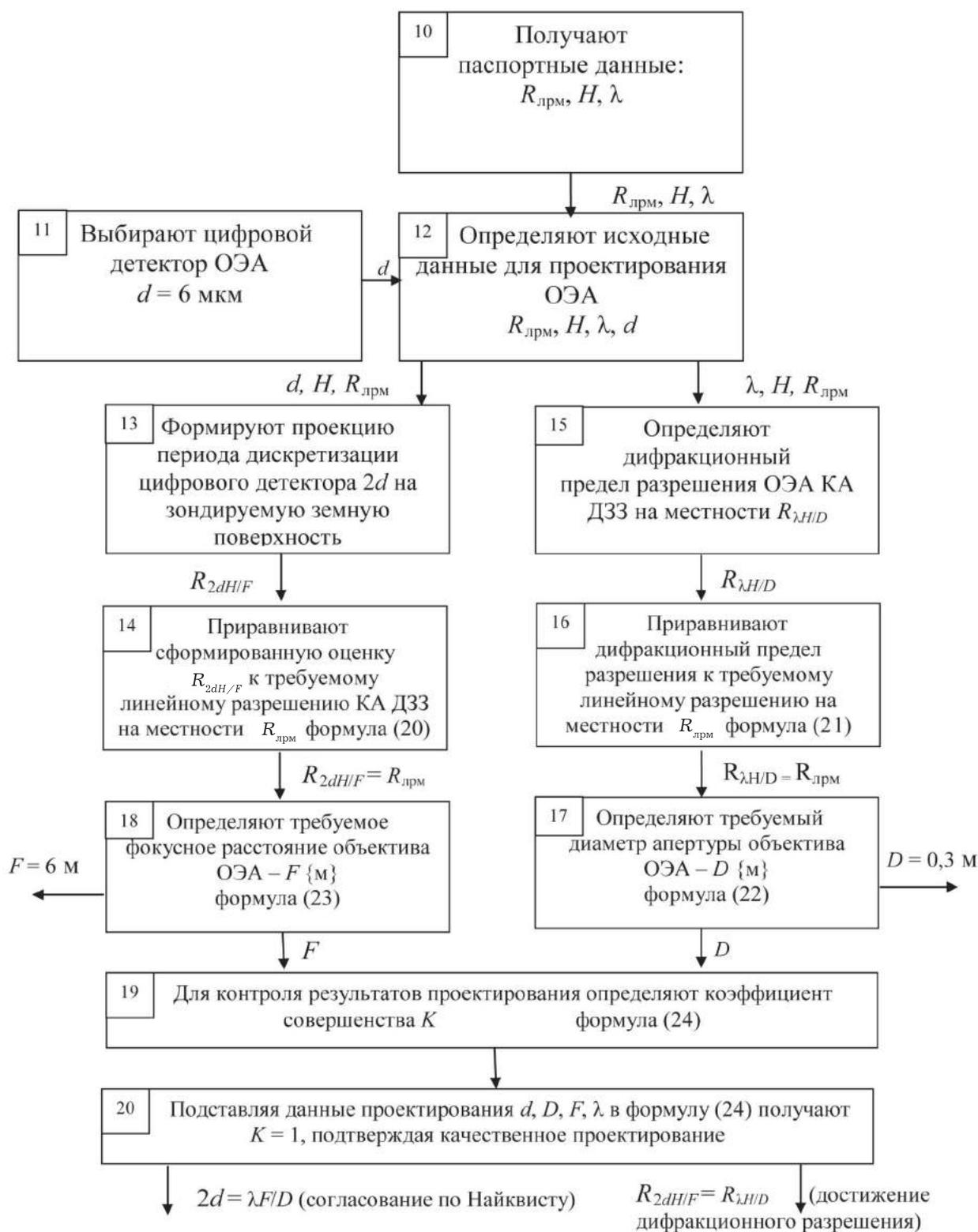


Рис. 4 Блок-схема реализации процесса проектирования ОЭА КА ДЗЗ, используя критерий оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности – РКС ($R_{2dH/F}$)

$$R_{2dH/F} = R_{\text{ЛРМ}} = 1 \text{ м} \quad (20)$$

15) определяют дифракционное разрешение объектива ОЭА КА ДЗЗ на местности $R_{\lambda H/D}$;

16) приравнивают его к требуемому линейному разрешению КА ДЗЗ на местности

$$R_{\lambda H/D} = R_{\text{ЛРМ}} = 1 \text{ м} \quad (21)$$

17) исходя из требуемого дифракционного разрешения объектива ОЭА на местности (21), определяют требуемый диаметр апертуры объектива D , как

$$D = \lambda H / R_{\text{ЛРМ}} \quad \{ \text{м} \} \quad (22)$$

и после подстановки исходных данных: $\lambda=0,6 \text{ мкм}$, $H=500 \text{ км}$ и $R_{\text{ЛРМ}}=1 \text{ м}$, аналогично (11), получают $D=0,3 \text{ м}$;

18) исходя из равенства (20), определяют требуемое фокусное расстояние объектива ОЭА, как

$$F = 2dH / R_{\text{ЛРМ}} \quad \{ \text{м} \} \quad (23)$$

и после подстановки исходных данных: $d=6 \text{ мкм}$, $H=500 \text{ км}$. $R_{\text{ЛРМ}}=1 \text{ м}$, получают $F=6 \text{ м}$.

Следует заметить, что полученное здесь фокусное расстояние объектива проектируемой ОЭА $F=6 \text{ м}$ в 2 раза превышает фокусное расстояние объектива $F=3 \text{ м}$, полученное при проектировании ОЭА на базе GSD.

19) для контроля результатов проектирования определяют коэффициент совершенства проектируемой ОЭА, как

$$K = R_{2dH/F} / R_{\lambda H/D} = 2dD / \lambda F, \quad (24)$$

20) подставляя данные спроектированной ОЭА КА ДЗЗ ($d=6 \text{ мкм}$, $D=0,3 \text{ м}$, $F=6 \text{ м}$, $\lambda=0,6 \text{ мкм}$) в формулу (24), получают коэффициент совершенства проектируемой ОЭА, равным единице ($K=1$), то есть

$$K = 2dD / \lambda F = 1 \quad (25)$$

откуда

$$2d = \lambda F / D, \quad (26)$$

а

$$R_{2dH/F} = R_{\lambda H/D} \quad (27)$$

Полученное выражение (26) есть ни что иное, как условие согласования аппаратуры КА ДЗЗ по критерию Найквиста, когда на дифракционный элемент разрешения объектива (диск Эри) $R_{\lambda F/D}$ в изображении приходятся два элемента разрешения детектора $2d$;

Итак, получили, что проектируемая ОЭА является совершенной ($K=1$) (25), согласована по критерию Найквиста (26) и обеспечивает достижение дифракционного предела разрешения (27).

При этом для нее получено: $D=0,3 \text{ м}$, $F=6 \text{ м}$, $d=6 \text{ мкм}$, $R_{2dH/F} = R_{\lambda H/D} = R_{\text{ЛРМ}} = 1 \text{ м}$.

Последовательность операций 10) ÷ 20) этого подхода проектирования ОЭА представлена на рис. 4.

Заключение

Итак, в результате проведенного рассмотрения можно сделать следующие выводы:

1. Известный критерий оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности GSD ($R_{\text{дн/Ф}}$) является некорректным для оценки, а его использование при проектировании ОЭА КА ДЗЗ препятствует согласованию объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста, устанавливая ограничение на коэффициент совершенства проектируемой ОЭА предельной величиной, равной $K=2$, что делает невозможным достижение дифракционного предела разрешения КА ДЗЗ на местности. Сегодня все КА ДЗЗ имеют коэффициент совершенства ОЭА $K > 2$ (Таблица 1).

2. При проектировании ОЭА КА ДЗЗ необходимо использовать критерий оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, предложенный РКС ($R_{2dH/F}$), который свободен от отмеченных недостатков GSD. Его применение позволяет согласовать проектируемую ОЭА по критерию Найквиста с коэффициентом совершенства ОЭА, равным $K=1$, и обеспечить достижение дифракционного предела разрешения КА ДЗЗ на местности.

Литература

1. Пат. № 2669262 Российская Федерация, МПК: G 03 B 37/00. Способ оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов ; патентообладатель АО «Российские космические системы»; № 2017144878; заявл. 20.12.2017; опубл. 09.10.2018, Бюл. № 28.
2. Уэзерелл, У. Оценка качества изображения / У. Уэзерелл // Проектирование оптических систем / под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанга. – М.: Мир, 1983. – С. 178–332.
3. Лавров, В. В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения / В.В. Лавров // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. – 2010. – № 2. – С. 19.
4. Ground Sample Distance (GSD)-Support [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://support.pix4d.com/he/en-us/articles/202559809>, свободный. – Загл. с экрана.
5. Хмелевской, С. И. Тенденции в развитии цифровых аэросъемочных систем. Критерии сравнения и оценки / С.И. Хмелевской // Геопрофи. – 2011. – № 1. – С. 11.
6. Замшин, В. В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений / В.В. Замшин // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 43.
7. Характеристика качества изображения на сайте НТЦ Красногорский завод им. С.А.Зверева [Электронный

ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zenitcamera.com/qa/qa-resolution.html>, свободный. – Загл. с экрана.

8. ГОСТ 15114–78. Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. – Введ. 30–01–78. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 6 с.

9. ГОСТ 2819–84 Материалы фотографические. Метод определения разрешающей способности. – Введ. 01–01–85. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 6 с.

10. Свиридов, К. Н. О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№1, 2, 3) / К.Н. Свиридов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, Вып. 2. – С. 20–28.

11. Свиридов, К. Н. О критериях оценки предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин // Информация и Космос. – 2018. – № 3. – С. 143–146.

Программы полярного управления относительным движением при неизменной ориентации космических аппаратов

Software for polar control of relative motion at constant orientation of spacecraft

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; относительное движение – relative motion; программа управления – control software.

В статье рассматриваются вопросы отыскания программ полярного управления относительным движением космических аппаратов, которые позволяют выполнить взаимный маневр при неизменной ориентации активного аппарата. В результате решения краевых задач для дифференциальных уравнений, описывающих относительное движение, найдены управляющие воздействия, требуемые для осуществления отдельных разновидностей маневра. Получены соотношения, позволяющие оценить энергозатраты на их выполнение.

The article deals with the issues of searching software for polar control of spacecraft relative motion enabling to perform a mutual maneuver at constant orientation of an active craft. As a result of solving boundary value problems for differential equations describing relative motion, control actions required to perform certain types of maneuver have been found. Relations enabling estimation of energy consumption for their implementation have been obtained.

В работе [1] получены программы управления относительным движением (ОД) космических аппаратов (КА), которые задают величину постоянных управляющих ускорений, создаваемых отдельными двигателями управляющей двигательной установки (ДУ) активного аппарата (АА) при декартовом управлении. Анализ этих программ показывает, что, если в системе управления АА используется ДУ, построенная по более экономичной полярной схеме, то направление создаваемого ею постоянного ускорения в опорной относительной системе координат (ОСК) может быть различным. Следовательно, для реализации управления может потребоваться различная ориентация корпуса АА в этой ОСК.

Задача ориентации АА в произвольном направлении в процессе взаимного маневра (ВМ) представляет собой достаточно сложную техническую проблему. Решение ее существенно упрощается, если это направление совпадает с одной из осей опорной ОСК.

Рассмотрим задачу отыскания программ полярного управления ВМ для данного случая. При решении этой задачи примем следующие исходные условия.

1. Пассивный аппарат (ПА), относительно которого осуществляет ВМ активный аппарат, вращается вокруг планеты по круговой орбите с постоянной угловой скоростью ω . АА перед началом ВМ перемещается по компланарной орбите, близкой к орбите ПА.

2. Движение центра масс АА рассматривается в ОСК $r_1 r_2 r_3$, начало которой совпадает с центром масс ПА. Ориентация и угловая стабилизация строительных осей КА осуществляется в этой ОСК.

3. Условия выполнения ВМ таковы, что для описания ОД можно воспользоваться линейной динамической моделью [2].

4. Ограничения на вид программной траектории ОД при выполнении ВМ отсутствуют.

5. Время выполнения маневра T задается перед его началом.

6. Модуль полярного управления \bar{u} – постоянная величина, т.е. $u = const$.

С учетом перечисленных условий для отыскания искомых программ полярного управления можно воспользоваться полученными в работе [1] векторно-матричными соотношениями, имеющими вид (1). Эти соотношения представляют собой решение краевой задачи для неоднородной системы линейных дифференциальных уравнений (ЛДУ) с постоянными коэффициентами и постоянными правыми частями, соответствующей используемой динамической модели ОД [3–5].

$$\vec{R} = \Phi_{11} \vec{R}_0 + \Phi_{12} \vec{V}_0 + F_1 \bar{u},$$

$$\vec{V} = \Phi_{21} \vec{R}_0 + \Phi_{22} \vec{V}_0 + F_2 \bar{u},$$

$$F_1 = \Phi_{11}F_{12} + \Phi_{12}F_{22}, \quad F_2 = \Phi_{21}F_{12} + \Phi_{22}F_{22}, \quad (1)$$

$$F_{12} = \int_{\tau_0}^{\tau} L_{12}(v, \tau_0)dv, \quad F_{22} = \int_{\tau_0}^{\tau} L_{22}(v, \tau_0)dv,$$

где $\vec{R} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}$ – вектор относительной дальности,

$\vec{V} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$ – вектор относительной скорости,

\vec{R}_0, \vec{V}_0 – значения этих векторов в момент начала маневра $\tau = \tau_0 = 0$,

$$\Phi_{11} = [a_{ij}]^{3 \times 3}, \Phi_{12} = [b_{ij}]^{3 \times 3}, \Phi_{21} = [c_{ij}]^{3 \times 3}, \Phi_{22} = [d_{ij}]^{3 \times 3}, L_{12} = [h_{ij}]^{3 \times 3},$$

$L_{22} = [g_{ij}]^{3 \times 3}$ – клеточные подматрицы третьего порядка матрицанта

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \text{ и обратного матрицанта } \Phi^{-1} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}$$

решений однородной системы ЛДУ, описывающей ОД.

Раскроем соотношения (1) и запишем на их основе уравнения для двух скалярных составляющих r_1 и r_2 , описывающих ОД в плоскости орбиты ПА. Эти уравнения будут иметь вид

$$r_1 = a_{11}r_{10} + a_{12}r_{20} + b_{11}v_{10} + b_{12}v_{20} + h_{11}u_1 + h_{12}u_2,$$

$$r_2 = a_{21}r_{10} + a_{22}r_{20} + b_{21}v_{10} + b_{22}v_{20} + h_{21}u_1 + h_{22}u_2. \quad (2)$$

Из соотношений (2) можно найти требуемые значения управляющего воздействия u_{Π} и начальной скорости $v_{\text{юП}}$ при управлении по одной из координат r_i , необходимые для выполнения маневра сближения с жестким контактом или с пролетом, если по другой координате управление отсутствует.

$$u_{\Pi} = \Delta_{2i} / D_{1i}, \quad v_{\text{юП}} = D_{2i} / D_{1i}, \quad (3)$$

где $D_{1i} = b_{1i}h_{2i} - b_{2i}h_{1i}$, $D_{2i} = h_{2i}a_{1i}^* - h_{1i}a_{2i}^*$,

$$\Delta_{2i} = b_{1i}a_{2i}^* - b_{2i}a_{1i}^*, \quad a_{ji}^* = r_{jk} - a_{j1}r_{10} - a_{j2}r_{20} - b_{j2}v_{20},$$

$$a_{j2}^* = r_{jk} - a_{j1}r_{10} - a_{j2}r_{20} - b_{j1}v_{10}, \quad i = 1 \dots 2, \quad j = 1 \dots 2.$$

Программы управления (3) справедливы для различных типов орбит ПА и различных фиксированных направлений корректирования ОД.

Рассмотрим несколько частных случаев, имеющих наибольшее практическое значение.

1. Корректирование вдоль местного горизонта.

Здесь направление корректирования совпадает с

осью x_b орбитальной ОСК, т.е. $r_1 = x_b$, а вдоль местной вертикали ($r_2 = y_b$) управление отсутствует. Программы управления маневром определяются из соотношений (3), если положить там $i = 1$. В случае круговой орбиты ПА элементы подматриц в этих соотношениях

$$a_{11} = 1, \quad a_{12} = 6(\tau - \sin \tau), \quad a_{21} = 0, \quad a_{22} = 4 - 3 \cos \tau,$$

$$b_{11} = 4 \sin \tau - 3\tau, \quad b_{12} = 2(1 - \cos \tau), \quad b_{21} = -b_{12}, \quad b_{22} = \sin \tau,$$

$$h_{11} = 4(1 - \cos \tau) - 1,5\tau^2, \quad h_{12} = 2(\tau - \sin \tau),$$

$$h_{21} = -h_{12}, \quad h_{22} = 1 - \cos \tau \quad (4)$$

при $\tau = T$.

Выполнив с учетом значений (4) ряд преобразований, получим

$$u_{x\Pi} = \Delta_{21} / D_{11}, \quad \dot{x}_{0\Pi} = D_{21} / D_{11}, \quad (5)$$

где

$$D_{11} = 3T^2(1 + \cos T) - 14T \sin T + 16(1 - \cos T),$$

$$\Delta_{21} = \dot{y}_0[3T \sin T - 8(1 - \cos T)] - [(x_0 - x_k)^2 + y_0 3T](1 - \cos T) - (y_0 - y_k)(4 \sin T - 3T),$$

$$D_{21} = (x_0 - x_k)2(T - \sin T) + (y_0 - y_k)[4(1 - \cos T) - 1,5T^2] + y_0 3[8(1 - \cos T) - 8T \sin T + 0,5T^2(5 + 3 \cos T)] - \dot{y}_0 T[1,5T \sin T - 4(1 - \cos T)].$$

2. Корректирование вдоль местной вертикали.

В этом случае направление корректирования совпадает с осью y_b орбитальной ОСК, т.е. $r_1 = y_b$. Управление вдоль местного горизонта ($r_2 = x_b$) отсутствует. Программы полярного корректирования также определяются соотношениями (3), если положить там $i = 2$.

Следовательно, при круговой орбите ПА имеем

$$u_{y\Pi} = \Delta_{22} / D_{12}, \quad \dot{y}_{0\Pi} = D_{22} / D_{12}, \quad (6)$$

где

$$D_{12} = 4(1 - \cos T) - 2T \sin T,$$

$$D_{22} = (y_0 - y_k)2(T - \sin T) - [(x_0 - x_k) + \dot{x}_0 T](1 - \cos T),$$

$$\Delta_{22} = (x_0 - x_k) \sin T - (y_0 - y_k)2(1 - \cos T) + y_0 3[2T \sin T - 4(1 - \cos T)] - \dot{x}_0 [3T \sin T - 8(1 - \cos T)].$$

3. Корректирование вдоль фиксированного направления в инерциальном пространстве.

В этой разновидности полярного управления направление корректирования совпадает с одной из осей невращающейся ОСК, например, с осью x_H , т.е. $r_1 = x_H$, а $r_2 = y_H$. Программы управления также определяются из соотношений (3), если положить там $i = 1$. Отличие от предыдущих случаев заключается в том, что элементы подматриц имеют другие значения [6]. Для круговой орбиты ПА они задаются соотношениями

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= 1 - \cos \tau (1 - \cos \tau), a_{12} = 3\tau \cos \tau - \\
 &- \sin \tau (2 + \cos \tau), a_{21} = -\sin \tau (1 - \cos \tau), \\
 a_{22} &= 3\tau \sin \tau - 2 + \cos \tau (2 + \cos \tau), \\
 b_{11} &= 2 \sin \tau (1 + \cos \tau) - 3\tau \cos \tau, \\
 b_{12} &= -(1 - \cos \tau)^2, b_{21} = 2(1 - \cos \tau)(2 + \cos \tau) - \\
 &- 3\tau \sin \tau, b_{22} = \sin \tau (2 - \cos \tau), \\
 h_{11} &= 2 \cos 2\tau - \cos \tau + 3\tau \sin \tau, \\
 h_{12} &= 2 \sin 2\tau - \sin \tau - 3\tau \cos \tau, \\
 h_{21} &= \sin 2\tau - 2 \sin \tau, h_{22} = 2 \cos \tau - \cos 2\tau
 \end{aligned} \quad (7)$$

при $\tau = T$

После ряда преобразований с учетом значений (7) получим программы полярного управления вдоль фиксированного направления в инерциальном пространстве

$$u_{x\Pi} = \Delta_{21} / D_{11}, \dot{x}_{0\Pi} = D_{21} / D_{11}, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}
 D_{11} &= 10,5T \sin T - 4,5T^2 \cos T + 4 \sin^2 T - 20(1 - \cos T), \\
 D_{21} &= [1,75 \sin 2T - 5 \sin T - 0,75T(3 - \cos 2T)]a_{11}^* - \\
 &- [1,5 \sin T(T \cos T + \sin T) - 5 \cos T(1 - \cos T)]a_{21}^*, \\
 \Delta_{21} &= [2 \sin T(1 + \cos T) - 3T \cos T]a_{21}^* - \\
 &- [2(1 - \cos T)(2 + \cos T) - 3T \sin T]a_{11}^*, \\
 a_{11}^* &= x_k - a_{11}x_0 - a_{12}y_0 - b_{12}\dot{y}_0, \\
 a_{21}^* &= y_k - a_{21}x_0 - a_{22}y_0 - b_{22}\dot{y}_0.
 \end{aligned}$$

Энергетические затраты на выполнение ВМ при использовании полученных программ полярного управления можно оценить по соотношениям

$$V_{p\Pi} = u_{i\Pi} T + \Delta v_{i0\Pi}, \quad (9)$$

где

$$\Delta v_{i0\Pi} = v_{i0T} - v_{i0}, \quad i = 1, 2.$$

В заключение отметим, что использование программ управления, определяемых соотношениями (5), (6) и (8), позволяет существенно упростить решение задачи сообщения программных приращений скорости центру масс АА в требуемом направлении при экономичном полярном способе управления.

Литература

1. Гончаревский, В. С. Взаимный маневр космических аппаратов при использовании управляющих двигателей непрерывной постоянной тяги / В.С. Гончаревский // Информация и Космос. – 2017. – № 3. – С. 144–146.
2. Гончаревский, В. С. Методы и алгоритмы управления относительным движением космических аппаратов / В.С. Гончаревский. – МО РФ, 1998. – 87 с.

3. Гноенский, Л. С. Математические основы теории управляемых систем / Л.С. Гноенский, Г.А. Каменский, Л.С.Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

4. Карташев, А. П. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления / А.П. Карташев, Б.Л. Рождественский. – М.: Наука, 1976. – 256 с.

5. Эльсгольц, Л. Э. Дифференциальные уравнения / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Издательство ЛКИ, 2014. – 312 с.

6. Гончаревский, В. С. Взаимный маневр космических аппаратов при использовании непрерывных управляющих функций постоянной величины в невращающейся относительной системе координат / В.С. Гончаревский // Информация и Космос. – 2014. – № 2. – С. 74–78.

Обработка видеoinформации в адаптивной системе контроля сближения космических аппаратов

Video processing in adaptive control system of spacecraft rendezvous

Бобровский / Bobrovskiy A.

Алексей Иванович

(albob@mail.ru)

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник.

ФГУП «Государственный

научно-исследовательский институт прикладных

проблем», начальник научно-исследовательского

центра.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: адаптация – adaptation; управление – control; обработка информации – data processing.

Рассмотрены основные методы обработки видеoinформации в системе контроля сближения космических аппаратов. Показано, что, в развитие итерационного принципа контроля сближения С. П. Королёва, к этапам сближения космических аппаратов должны адаптироваться параметры разложения изображения, обработки информации в контуре управления видеoinформационной системой и в кодере источника.

Basic methods of video processing in adaptive control system of spacecraft rendezvous have been reviewed. It has been shown that following S.P. Korolev's anti-collision principle, the parameters of image decomposition, data processing in video information system control circuit and in the source coder shall be adapted to the stages of spacecraft rendezvous.

Идея адаптации системы контроля сближения космических аппаратов (КА) с использованием видеoinформационных измерительных систем, является развитием принципа итерационного контроля сближения КА, выдвинутого С. П. Королёвым в работе «Предложения по созданию средств для орбитальной сборки» [1]. Итерационный принцип сразу привёл к применению двух телекамер – с широким и узким углом поля зрения [2], после перехода к твердотельным матричным фотоприемникам была выдвинута идея изменения кадровой частоты и числа пикселей (чёткости) изображения [3, 4]. Основным результатом разработки методов адаптации видеoinформационной системы контроля сближения КА стало правило выравнивания дисперсий приращений сигнала изображения по полю $D_{\Delta x}$ и по времени $D_{\Delta t}$. Затем была выявлена необходимость перехода от традиционных

систем управления по разности наблюдаемого сигнала и опорной величины (напр., [5, 6]) к решающей статистике отношения измеренных дисперсий межэлементных и межкадровых приращений $D_{\Delta t}/D_{\Delta x}$ [7, 8].

Современный этап моделирования, структурного и статистического параметрического синтеза обработки видеoinформации в системе контроля сближения КА (рис. 1) [9, 10] характеризуется формализацией критериев качества работы и адаптации параметров этой проблемно-ориентированной системы управления и принятия решения в целом и её подсистем – обнаружения оптического сигнала от кооперируемого КА на дальней дистанции, управления параметрами разложения изображения в фотоприёмной матрице, и кодирования источника (сжатия информации). Не затрагивая вопросов формирования оптимального управления кинематикой сближения КА [11] и возможных уточнений моментов переключения параметров системы на основе априорной информации о конструктивных свойствах кооперируемого КА [12], рассмотрим основную специфику системы обработки информации и управления режимами работы фотоприёмной матрицы.

На всех этапах обработки видеoinформации адаптация обусловлена существенными изменениями статистик сигнала по мере изменения дальности до КА: видимой яркости, размеров и скорости объекта, а также ограничениями:

– фотоприёмник имеет не только конечное число $N_{\text{макс}}$ пикс., но и конечную скорость считывания информации $F_{\text{сч}}$, т. е. максимальную кадровую частоту $F_{\text{к}}$ при этом числе пикселей: $F_{\text{к}} \times N_{\text{макс}} \leq F_{\text{сч}}$.

Адаптация параметров разложения для разных дистанций имеет свои важные особенности. На больших дальностях после обнаружения КА [13] и оценки его пространственных координат осуществляется переход (рис. 2):

- от широкоугольной телекамеры к соосной узкоугольной телекамере [2];
- от наблюдения при большом времени накопления (низкой кадровой частоте, необходимой для повышения дальности обнаружения) к кадровой частоте $F_{к0}$, предельно возможной при полной чёткости $N_{макс}$ пикселей применённой фотоприёмной матрицы [9, 10];
- от наблюдения с полной чёткостью к сокращённой чёткости с повышением кадровой частоты для уменьшения динамического промаха [7–10].

В силу дискретности раstra изменение чёткости изображения может осуществляться группированием сигналов пикселей только дискретно, что в совокупности с флуктуациями решающей статистики из-за шумов видеосигнала вносит важную специфику в синтез системы управления.

Адаптация параметров на этапе сопровождения объекта при дискретном обмене чёткости и кадровой

частоты в матричных фотоприемниках имеет аналогию в последовательном анализе по Вальду [14]. В синтезированной системе управления так же, как в [14], формируется два порога (верхний и нижний), причём, если решающая статистика больше верхнего порога, то в последовательном анализе принимается первая гипотеза (например, о наличии сигнала объекта). Аналогично в синтезированной системе управления при значениях решающей статистики выше верхнего порога устанавливается (сохраняется) высокая чёткость; если решающая статистика ниже нижнего порога, в последовательном анализе принимается альтернативная гипотеза, в рассматриваемой системе управления устанавливается (сохраняется) высокая кадровая частота. Если значение решающей статистики находится между порогами – обе концепции предлагают продолжать наблюдение.

В некотором смысле обработка информации в синтезированной системе при критерии максимума времени

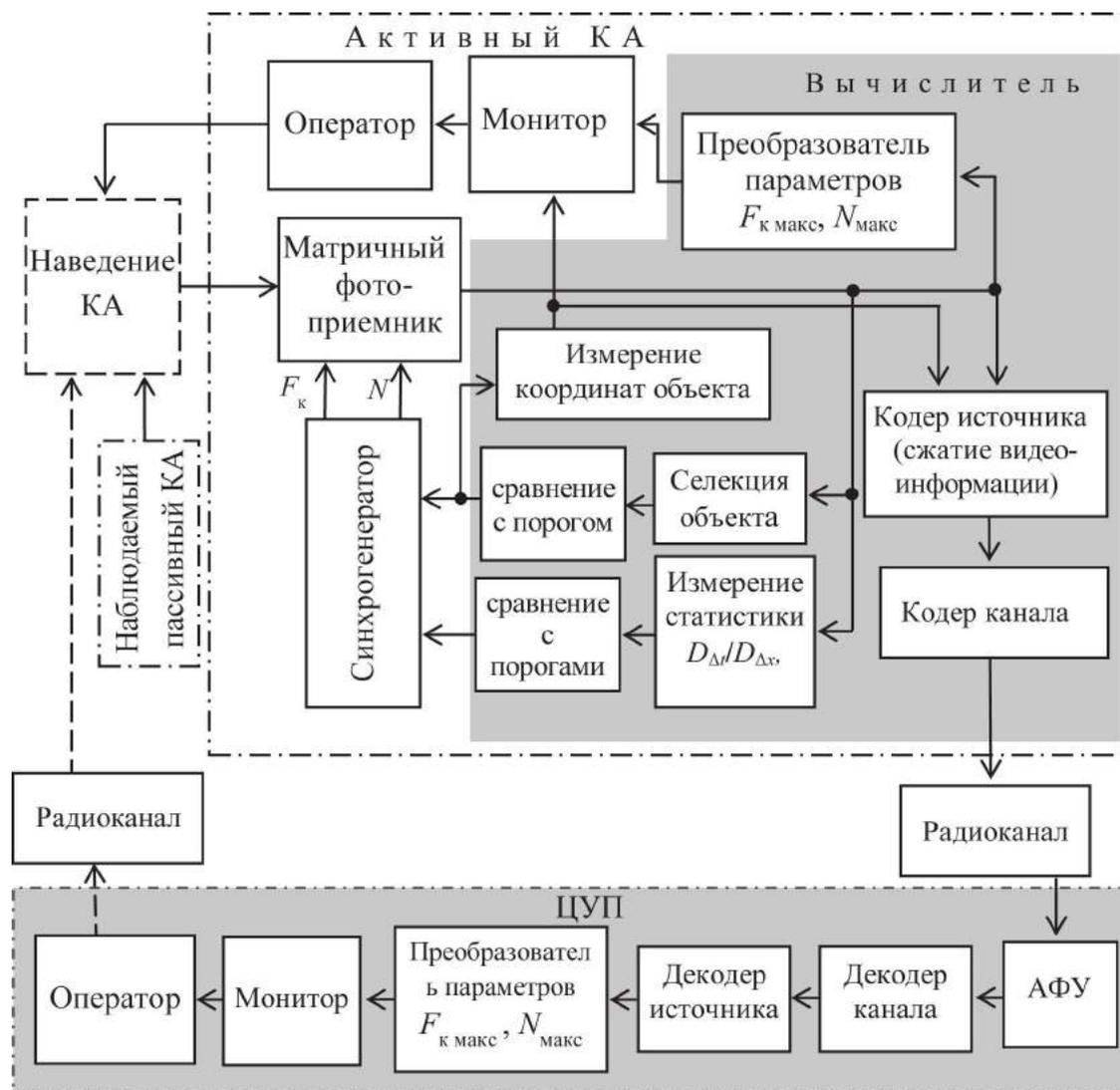


Рис. 1. Структура видеоинформационной системы контроля сближения КА

нахождения системы в состоянии решающей статистики между порогами [10] аналогична решению задачи о разладке [15], в которой находится минимум времени принятия решения при заданной вероятности ложной тревоги: при обработке информации в обеих системах оптимум ищется вариацией порога принятия решения и постоянной времени рекурсивного фильтра формирования решающей статистики.

В общем случае система может иметь множество состояний с различным числом эффективных пикселей (полученных группированием исходных пикселей по 2×2 , 3×3 , 4×4 и т. д.) с соответствующим увеличением кадровой частоты. Динамика изменения параметров разложения, качественно намеченная на рис. 2, иллюстрируется фазовым портретом системы (рис. 3), показывающим изменение состояния системы по мере сближения КА.

В общем случае дискретных состояний системы может быть много, но ниже рассмотрим наглядный вариант системы с двумя состояниями 2, 3, 5. Экспериментальная проверка обмена пространственной чёткости и кадровой частоты [13] (рис. 4) показала реализуемость и эффективность разработанной концепции. При моделировании смена режимов производится со следующими параметрами (отрабатываются варианты для реальной системы с существенно большим исходным форматом):

- Режим 1 (исходный): размер изображения 840×540 , частота кадров 5 Гц;
- Режим 2: размер изображения 420×270 , частота кадров 10 Гц;

- Режим 3: размер изображения 210×135 , частота кадров 20 Гц.

В процессе контроля сближения и стыковки наблюдаемое положение КА претерпевает два вида изменений: в силу наличия скорости сближений и в силу импульсной коррекции траектории активного КА. Поэтому фильтрация решающей статистики по критерию минимума среднуквадратической ошибки, как для нестационарного процесса, включает как элементы линейной фильтрации, так и нелинейной фильтрации – обнаружения маневра кооперируемого КА [16].

При отображении видео на мониторе (в схеме рис. 1 как на борту, так и в ЦУП – после декодирования), каждый кадр выстраивается в видеокарте в виде отдельной картинки, а далее выводится на монитор, имеющий частоту полной смены изображения, к примеру 60 Гц. Если на нем отображается видео с кадровой частотой 5 Гц, то видеокарта посылает на монитор один и тот же кадр сюжета 12 раз, при кадровой частоте 10 Гц – 6 раз, при кадровой частоте 20 Гц – 3 раза. При этом видеокарта, получив изображение любого из применённых форматов, должна растянуть его до размеров монитора аппаратным методом интерполяции, не влияющим на производительность, (билинейная либо бикубическая), т. е. каждый кадр сюжета видеокарта перед выводом изображения на монитор интерполирует его, а потом выводит несколько раз в зависимости от кадровой частоты сюжета.

Важной особенностью бортовой системы обработки видеoinформации на рис. 1 является взаимосвязь её подсистем: обнаружение и оценивание координат объекта

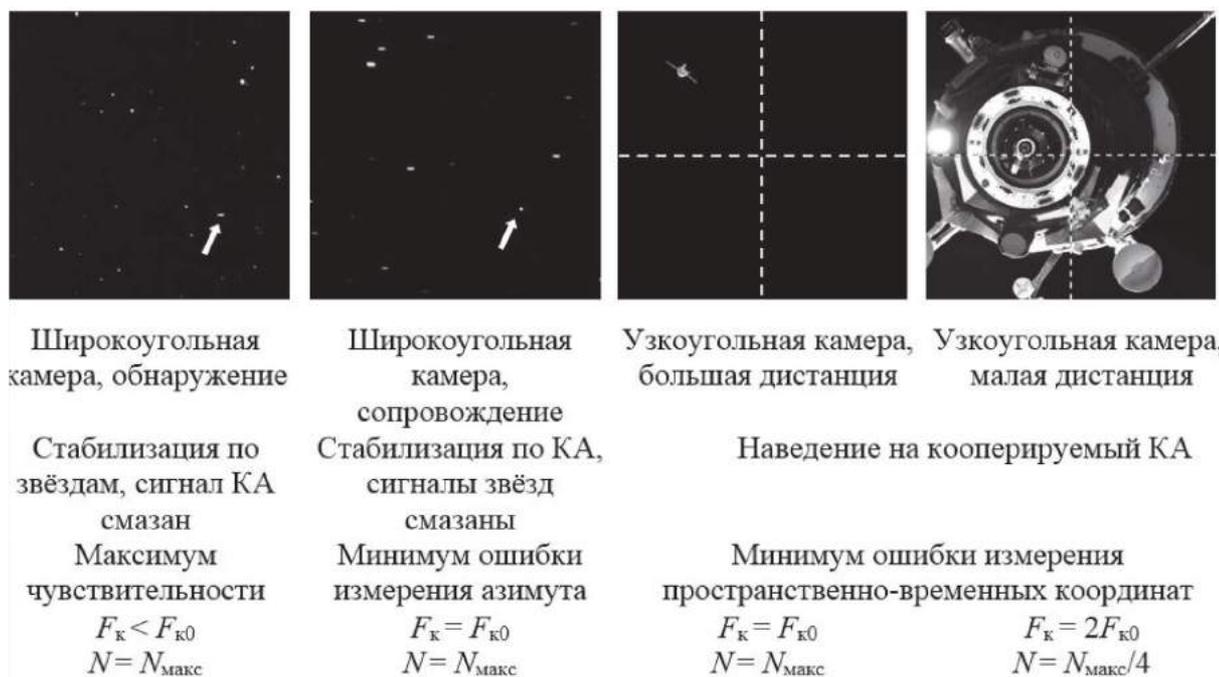


Рис. 2. Этапы адаптации телевизионной системы

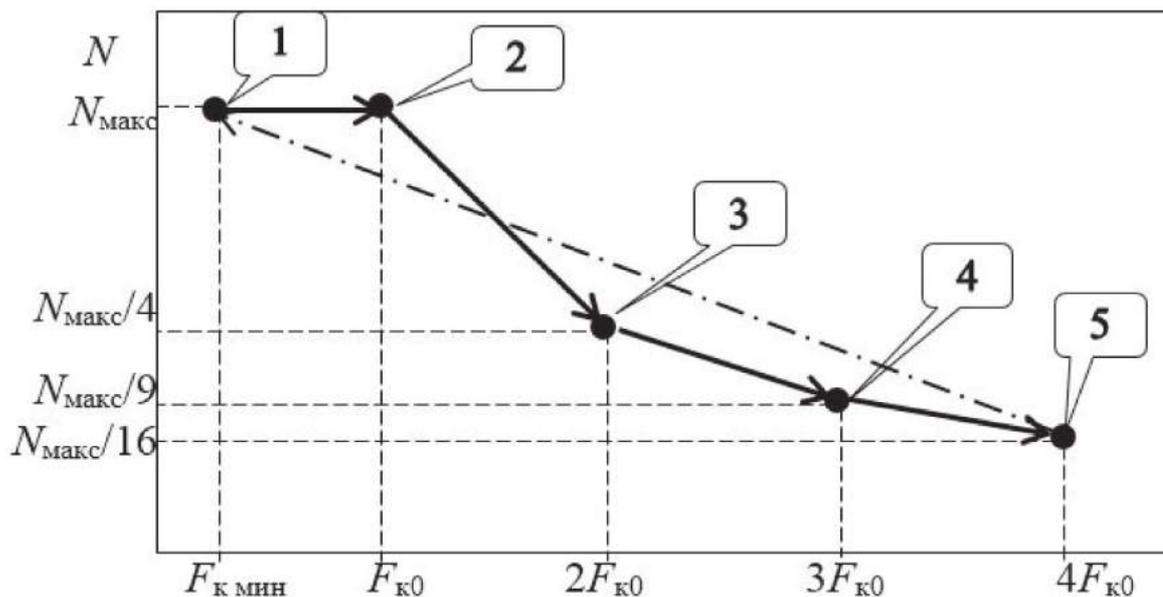


Рис. 3. Состояние 1 – низкая кадровая частота, высокая четкость; состояние 2 – максимальная кадровая частота $F_{к0}$ при полной четкости; состояние 3 – повышенная в 2 раза кадровая частота; состояние 4 – повышенная в 3 раза кадровая частота; состояние 5 – повышенная в 4 раза кадровая частота; пунктир – переход системы в исходное состояние по завершении стыковки КА

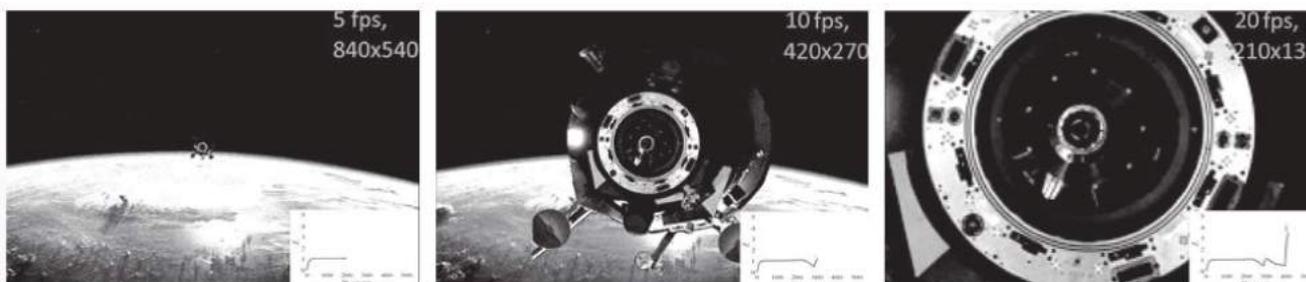


Рис. 4. Выборочные кадры из видеофильма, сформированного с помощью системы с взаимодействием кадровой частотой и числа пикселей, адаптирующимися к изменению решающей статистики отношения межкадровых и межэлементных приращений по мере приближения КА

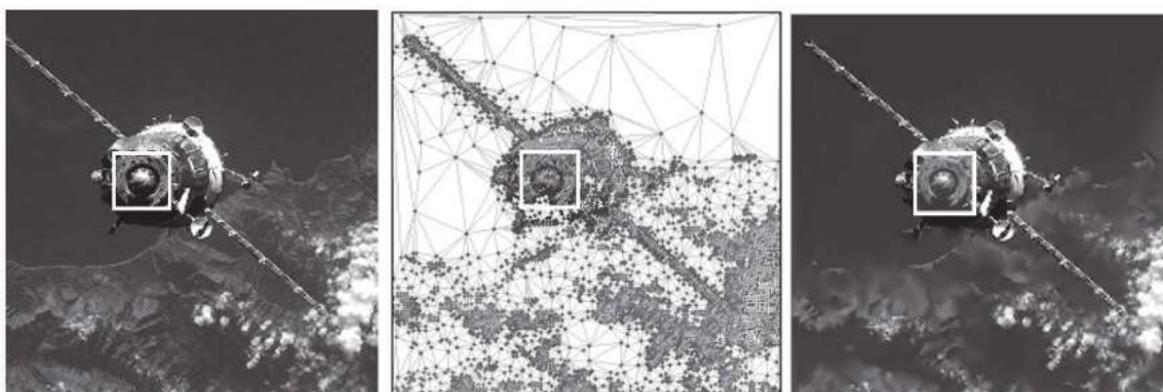


Рис. 5. Пример кодирования и декодирования изображения по опорным точкам с различными порогами для объекта и фона; порог выделения опорных точек в окне интереса $\gamma_o = 13$, вне окна $\gamma_\phi = 98$, передаваемая информация в окне $R_o = 4,2$ бит/пиксел, вне окна $R_\phi = 0,8$ бит/пиксел

управляет параметрами и фотоприемной матрицы, и кодера изображения (в силу требования минимальных задержек кодирование должно осуществляться как внутрикадровое, напр. на основе дискретного косинусного преобразования, как в JPEG, или по опорным точкам [17]). Формируемые оценки видимых размеров объекта (в окне интереса) позволяют осуществлять кодирование-декодирование видеoinформации с различными точностями (порогами выделения спектральных компонент или опорных точек) для доминантного фрагмента и фонового изображения (рис. 5).

В результате такого адаптивного кодирования среднеквадратическая ошибка восстановления сигнала в окне и вне его различна (для рис. 5 соответственно 13 и 88), что позволяет достичь сокращения скорости передачи на порядок без снижения точности оценок пространственно-временных координат объекта.

Заключение

Обработка информации в фотоприемной матрице и бортовом цифровом процессоре контура управления видеoinформационной системой и кодирования источника должна адаптироваться к этапам сближения КА. Адаптация телевизионной системы к дистанции до кооперируемого КА позволяет найти решение задачи минимизации ошибок измерения изменяющихся во времени координат объектов при ограничении скорости считывания информации с фотоприёмных матриц. В решение задачи входят условные оптимальные чёткость и кадровая частота при их дискретно переключаемом взаимобмене, осуществляемом на основе тенденции к равенству дисперсий межэлементных и межкадровых приращений. Требование устойчивости системы автоматического управления параметрами разложения измерительной системы обуславливает введение гистерезиса, определяемого дискретностью раstra и флуктуациями решающей статистики.

Изложенная концепция является отражением нового направления в теории прикладных видеoinформационных систем: оптимизация системы имеет целью извлечение информации максимального качества, без оглядки на ограниченность зрения человека-наблюдателя, с учётом ограничения пропускной способности каналов связи телекамеры и бортового компьютера и/или ЦУП, отражает важный эффект влияния твердотельной технологии на изменение методов системного анализа и синтеза, оптимизации, управления, принятия решений и обработки видеoinформации.

Литература

1. Творческое наследие академика Сергея Павловича Королёва. Избранные труды и документы / Под ред. М. В. Келдыша – М., Наука, 1980. – 592 с.
2. Брацлавец, П. Ф. Космическое телевидение / П.Ф. Брацлавец, И.А. Росселевич, Л.И. Хромов. – М., Связь, 1967. 2-е изд, 1973. – 248 с.

3. Козлов, В. В. Реализация принципа итерационного сближения в космическом телевидении / В.В. Козлов // Информатика и Космос. – 2012. – № 1. – С. 85–88.

4. Адаптация космической телевизионной системы к этапам наблюдения объектов / А.А. Манцветов [и др.] // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения. – 2012. – Вып. 1. – С. 29–43.

5. Микрин, Е. А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов / Е.А. Микрин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 245 с.

6. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В.В. Кульба [и др.] ; под ред. Е. А. Микрина. – М.: Наука, 2006. – 579 с.

7. Теория и практика космического телевидения / под ред. А.А. Умбиталиева, А.К. Цыцулина. – СПб: НИИ телевидения, 2017. – 368 с.

8. Статистический синтез управления телевизионной системой, адаптивной к динамике сюжета / А.А. Умбиталиев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2016. – Вып. 1. – С. 3–11.

9. Адаптация параметров разложения телевизионного координатора целей / А.А. Умбиталиев [и др.] // Труды военно-научной конференции «Актуальные научно-технические аспекты разработки, испытаний и эксплуатации средств ракетно-космической обороны». СПб, ВКА им. А. Ф. Можайского, 20 октября 2017 г. – С. 183–188.

10. Бобровский, А. И. Адаптация прикладной телевизионной системы к динамике сюжета / А.И. Бобровский // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – № 3. – С. 3–9.

11. Гончаревский, В. С. Оптимальное управление взаимным манёвром космических аппаратов при использовании методов инерциального параллельного сближения и сближения по радиолучу / В.С. Гончаревский // Информатика и Космос. – 2018. – № 1. – С. 150–154.

12. Бачевский, С.В. Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорций в матричных телевизионных системах / С.В. Бачевский // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2010. – Вып. 1. – С. 57–66.

13. Обнаружение объектов на звёздном фоне / Г.В. Левко [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2016. – Вып. 2. – С. 29–38.

14. Вальд, А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М.: Физматгиз, 1960. – 328 с.

15. Ширяев, А. Н. Статистический последовательный анализ / А.Н. Ширяев. – М.: Наука, 1976. – 272 с.

16. Рекурсивная фильтрация опорной статистики адаптивной телевизионной системы/ А.К. Цыцулин [и др.] // Материалы 15-й Международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений». Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 26–27 июня 2017 г. – С. 199–203.

17. Систематизация алгоритмов нахождения и кодирования опорных точек изображений / А.И. Бобровский [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2017. – Вып. 3. – С. 29–38.

Реализация автономного распределенного управления орбитальными системами космических аппаратов с использованием современных информационных технологий

Design of autonomous distributed control for spacecraft orbital systems based on advanced IT solutions

Селиванов / Selivanov A.

Андрей Алексеевич
(Tormentor2000@mail.ru)
кандидат технических наук.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского»
(ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ,
старший преподаватель кафедры «Автономных систем управления».
г. Санкт-Петербург

Фарафонов / Farafonov A.

Александр Владимирович
(Farik196@mail.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательской лаборатории,
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Ляшевский / Lyashevsky A.

Александр Валерьевич
(11k77@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательской лаборатории,
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Миронов / Mironov E.

Евгений Андреевич
(john682@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
доцент кафедры «Метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники».
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космический аппарат – spacecraft; многофункциональность – multifunctionality; управление – control; автономность – independence; распределенность – distribution; информационные технологии – IT solutions; многоагентные системы – multiagent systems.

В статье описана методика автономного распределенного управления орбитальными системами космических аппаратов на основе использования теории многоагентных систем. В статье приведены принципы распределенного автономного управления, обоснована необходимость повышения автономности управления орбитальными системами. Материал статьи может быть полезен при обосновании требований к перспективным орбитальным системам многофункциональных малогабаритных космических аппаратов.

The article describes the method of autonomous distributed control for spacecraft orbital systems based on multi-agent systems solution. The article describes the principles of distributed autonomous control, substantiates the need to increase independence of orbital systems control. The article material may be useful in justifying the requirements for advanced orbital systems of multifunctional small-sized spacecraft.

Существующие проблемы при решении задач управления орбитальными системами космических аппаратов и пути их решения

Одним из наиболее важных видов обеспечения, реализуемых космическими системами и комплексами, является информационное обеспечение. В совокупности проблем, стоящих на пути решения задачи повышения эффективности применения космических систем и комплексов, важное место занимают проблемы управления орбитальными системами (ОС) в целом и входящими в ее состав отдельными космическими аппаратами (КА).

Система управления ОСКА состоит, как правило, из двух связанных радиолиниями комплексов:

- наземного комплекса управления;
- бортового комплекса управления.

При этом наземный комплекс управления (НКУ) представляет собой географически распределенную структуру измерительных пунктов, связанных линиями передачи данных и команд с центром управления полетами, центром обработки телеметрической информации, баллистическим центром. Периферийные структурные элементы НКУ – измерительные пункты – связаны с центральными структурными управляющими элемен-

тами линиями связи и оснащены средствами приема и передачи информации с КА. Данная структура контура управления достаточно легко выводится из строя, что влечет за собой риск потери управления космическим сегментом в целом. Повышение устойчивости ОСКА в таком случае напрямую связано с повышением автономности ее функционирования и снижением зависимости космического сегмента от наземного. Этого можно достичь при реализации следующих принципов, положенных в основу решения задач управления при рассмотрении ОСКА как сложной системы:

- автономности;
- распределенности.

Анализ состояния объекта управления и формирование управляющих воздействий, также реализуется средствами и персоналом НКУ [1–5]. Это может привести к снижению качества выполнения ОСКА целевой задачи вследствие возможности вывода НКУ из строя ввиду воздействия различных факторов. Также в настоящее время существует тенденция сокращения наземного сегмента автоматизированной системы управления (АСУ) космическими аппаратами.

Выходом из сложившейся ситуации может служить перераспределение функций управления ОСКА между НКУ и бортовыми комплексами управления (БКУ) КА с существенным расширением возможностей и перечня задач, решаемых бортовыми средствами, что приведет к повышению автономности управления функционированием ОСКА.

Реализация автономного управления функционированием ОСКА обеспечит возможность перехода от командно-программного способа управления на основе жестких временных программ к программно-координатному и интеллектуально-ситуационному управлению. Это может обеспечить повышение качества выполнения целевых задач ОСКА в целом [6, 7]. Основными функциями управления ОСКА являются:

- управление движением КА системы, включая автономную навигацию;
- контроль технического состояния и диагностирование бортового оборудования КА системы;
- адаптация к изменениям условий функционирования и целей применения, включая автономное планирование работы бортового оборудования космических аппаратов.

При переносе решения данных задач из наземного сегмента НКУ на уровень бортового комплекса управления КА, возникает ряд проблем, определяемых следующими факторами:

- высокая размерность пространства состояний;
 - разнотипность по своей природе объектов управления и большие объемы обрабатываемых потоков данных;
 - сложность объектов управления, принципиальная неформализуемость ряда управляемых процессов;
 - существенная априорная неопределенность условий применения;
 - высокие требования к оперативности управления.
- Анализ работ [8, 9, 10] свидетельствует о сложив-

шейся на сегодняшний момент противоречивой ситуации: постоянное возрастание требований к оперативности целевого применения и устойчивости управления орбитальными системами определяет необходимость дальнейшего повышения автономности управления функционированием ОСКА, которое не может быть обеспечено существующими методами и средствами управления.

Одним из путей решения преодоления вышеуказанных проблем при решении задач распределенного автономного управления ОСКА может быть применение нетрадиционных информационных технологий, опирающихся на принципы и парадигмы искусственного интеллекта.

В качестве базовой концепции повышения автономности управления функционированием ОСКА принимается концепция реализации распределенного автономного управления на основе применения современных методов искусственного интеллекта. ОСКА рассматривается как система взаимодействующих во времени и пространстве совокупности КА, каждый из которых представляет собой интеллектуальный программный робот (ИПР). Под ИПР понимается совокупность алгоритмов, реализованных в виде законченного программного продукта для реализации задач в процессе применения КА системы. Классификация ИПР проводится в соответствии с функциональными задачами, решаемыми БКУ КА в процессе функционирования. КА системы организованы в информационную сеть, узлы и ресурсы которой используются при решении как целевых задач, так и задач управления. ОСКА рассматривается как автономная сетевая структура взаимодействующих ИПР, выполняющих целевую задачу с необходимым качеством.

Одна из особенностей решения задач управления функционированием ОСКА заключается в том, что многие из них решаются персоналом НКУ и относятся к классу интеллектуальных. Наиболее часто необходимость решения таких задач появляется при возникновении нештатных ситуаций в процессе управления функционированием ОСКА либо при необходимости оперативного изменения плана применения КА системы. Все это приводит к сложности, а в ряде случаев и невозможности, формализации задач автономного управления ОСКА и обуславливают возможные пути их решения с привлечением методов и технологий, опирающихся на принципы и парадигмы искусственного интеллекта.

Функции автономного распределенного управления ОСКА

Говорить о полном автономном функционировании ОСКА (выполнении целевых задач) не вполне корректно, так как само выполнение целевых задач требует связи с наземными средствами для их формирования и передачи на борт КА системы исходных данных для решения целевых задач и приема результатов их решения. Поэтому корректно говорить не об

автономном функционировании ОСКА в целом, а об автономном управлении функционированием космической системы, как о процессе формирования и реализации на борту КА системы всех или группы управляющих функций, обеспечивающих выполнение целевых задач с заданным уровнем эффективности. В зависимости от полноты реализации управляющих функций автономное управление функционированием ОСКА может быть полным, либо только по группе функций.

Основными функциями автономного распределенного управления являются:

- управление движением космических аппаратов ОСКА, включая автономную навигацию и прогнозирование параметров движения центра масс, определение углового положения КА и управление ориентацией, поддержание номинальных параметров орбитального движения и маневр уклонения с последующим восстановлением номинальной орбиты;

- контроль технического состояния, диагностирование бортового оборудования (БО) и управление функциональным ресурсом борта космических аппаратов системы, включая формирование телеметрической информации (ТМИ), распознавание нештатных ситуаций, автономное устранение неисправностей, возможность возникновения которых заранее предусмотрена, обеспечение функционирования при проявлении скрытых дефектов или ошибок программного обеспечения;

- адаптация к фактическим условиям функционирования и применения, включая определение как априори предсказуемых, так и непредсказуемых изменений операционной ситуации и планирование работы КС из условий достижения максимальной эффективности применения отдельного КА и ОСКА в целом.

Принципы автономного распределенного управления ОСКА

Применение ОСКА, как совокупности согласованно действующих КА-ИПР, позволяет предложить новый подход к управлению космическими средствами, основанный на управлении не каждым отдельным КА, а системой в целом. Основным свойством такой системы является то, что качество выполнения целевой задачи зависит не только от состояния отдельного КА, но и от взаимодействия КА в процессе функционирования. Появляется возможность за счет управления общесистемными ресурсами (перераспределения ресурсов) ОСКА получить требуемое качество выполнения целевой задачи, не повышая требований к качеству функционирования (характеристикам БКУ) отдельного КА. Таким образом, реализуется принцип распределенности управления.

Расширение возможностей и перечня задач, решаемых бортовыми средствами, передача ряда функций управления от НКУ на уровень сети КА-ИПР приведет к реализации автономности управления функционированием ОСКА.

При управлении ОСКА, как совокупностью согласованно действующих подвижных объектов, можно говорить о рациональном (допустимом) управлении в интересах выбранного критерия оптимальности управления, либо критерия выполнения целевой задачи системой. Достаточно сложно выделить только один критерий оптимальности при решении задачи управления ОСКА и, в общем случае, данная задача является многокритериальной в нештатной постановке. В данном случае достаточно найти допустимое (рациональное) решение с точки зрения качества выполнения целевой задачи в целом.

При управлении ОСКА необходимо учитывать изменения исходных данных функционирования системы, что говорит об адаптивном управлении.

Таким образом, распределенное автономное управление функционированием ОСКА должно строиться на основе следующих принципов.

Принцип распределенности – решение задач функционирования и управления распределено между КА системы. Выход из строя одного или нескольких КА не приводит к существенному падению качества решения этих задач.

Принцип автономности – решение задачи по управлению функционированием КС должно осуществляться бортовыми средствами КА.

Принцип рациональности – отсутствие поиска строго оптимального управления.

Принцип адаптивности – ОСКА должна оперативно реагировать на изменение условий выполнения целевой задачи без ущерба для потребителей.

Управление, построенное в соответствии с данными принципами, строится с учетом особенностей коллективного поведения КА-ИПР, которое предлагается использовать для решения задачи повышения эффективности управления функционированием ОСКА.

Решение задачи планирования применения орбитальной системы КА при интеллектуальном распределенном управлении

В процессе функционирования ОСКА, различают следующие типы управляющих воздействий.

На уровне КА:

- координатное, при котором реализуются функции системы управления движением и навигации (СУДН);

- параметрическое, при котором управляющие воздействия направлены на изменение или поддержание в заданных пределах значений физических параметров КА и его подсистем;

- структурное, при котором управляющие воздействия направлены на изменение состава взаимодействующих элементов КА или связей между ними.

Для уровня КС на первый план выходят вопросы структурного управления. В этом случае необходимо рассматривать вопрос разработки единой системы управления КС различного целевого назначения. На уровне КС такая единая система должна решать следующие задачи:

1) управление баллистической структурой КС – функция поддержания параметров движения КА в допустимых пределах;

2) управление количественным составом КС – функция технического диагностирования состояния отдельных КА и их выполнения в нештатных ситуациях.

3) управление применением КА системы – функция планирования процессов выполнения целевой задачи [8, 9].

Все выше перечисленное определяет структуру КС. Структура КС включает в себя:

– баллистическую структуру – орбитальное построение КА в пространстве баллистических параметров;

– структуру аппаратных средств – собственно КА с их приборным составом;

– структуру информационных потоков – информационные потоки по управлению КС и обработке специальной информации.

Соответственно, в процессе функционирования необходимо управлять параметрами структуры КС таким образом, чтобы качество выполнения целевой задачи удовлетворяло заданным требованиям, часть задач решаемых НКУ необходимо переносить на борт КА системы. К числу таких задач относятся:

1) формирование бортовой навигационной информации и расчет программы движения при выполнении маневра;

2) диагностирование и оценивание технического состояния системы, организация управления при неисправностях бортовой аппаратуры с целью минимизации возможного ущерба;

3) сбор и первичная обработка информации, получаемой специальной аппаратурой;

4) планирование применения КА системы.

Рассмотрим применение методов распределенного автономного управления при решении основной задачи управления КС – задачи планирования применения.

Решение с учетом ограничений и требований, описанных выше, подразумевает использование для решения парадигм искусственного интеллекта, в частности методологии многоагентных систем [10].

Исходные данные:

– баллистическая структура ОСКА, описываемая множеством

$$\mathbf{B}^{ОСКА} = \{\bar{\mathbf{X}}_m\}, \text{ где } m = \overline{1, N}$$

$$\bar{\mathbf{X}}_m = (i, \Omega, p, e, \omega, \vartheta)^T$$

N – число КА в ОСКА;

$\bar{\mathbf{X}}_m$ – вектор кеплеровских элементов орбиты КА;

– районы зон обслуживания

$$\Xi = \{\Xi_l\}, \text{ где } l = \overline{1, L}$$

$$\Xi_l = \{\varphi_n, \varphi_o, \lambda_n, \lambda_o\}$$

L – количество зон обслуживания;

φ_n, λ_n – географические координаты входа в зону обслуживания;

φ_o, λ_o – географические координаты выхода из зоны обслуживания;

– параметры информационного кадра (k_m), снятого с зоны обслуживания:

t_n – время поступления кадра;

t_k^o – директивное время окончания обработки кадра;

τ – продолжительность обработки;

m – номер КА, получившего кадр;

l – номер зоны обслуживания;

– параметры ИПР

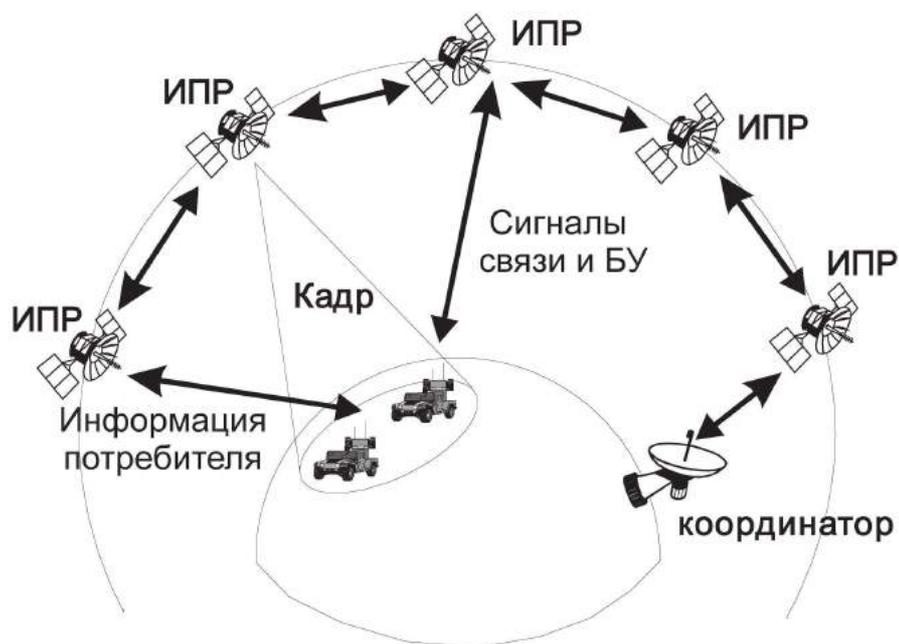


Рис. 1. Схема информационных потоков ОСКА

$t_{ин}^z$ – время входа в зону обслуживания m -го КА;
 $t_{км}^z$ – время выхода из зоны обслуживания m -го КА;
 R_m – коэффициент быстродействия m -го КА.

Требуется найти план обработки информации (k_{mi}), снятой с локальных районов, на директивно заданном интервале перспективного планирования вычислительными средствами системы при заданных ограничениях и минимизирующий время обработки первичной информации (рис. 1).

Данная постановка задачи сформулирована с точки зрения решения задачи планирования применения ОСКА с использованием методологии многоагентных систем.

Поставленная задача декомпозируется и решается путем организации механизма аукциона за право обработки тем или иным КА информационного кадра обслуживаемого района.

Таким образом, применение парадигм искусственного интеллекта, в частности методологии многоагентных систем, позволяет формализовать и решить задачу планирования применения многоспутниковой ОСКА с применением принципов распределенного автономного управления.

Заключение

При распределенном автономном управлении функционированием ОСКА по своей трудоемкости и сложностью формализации выделяется задача планирования применения системы.

Существующая практика методов решения задач управления функционированием ориентирована на применение НКУ и не адаптирована для автономного решения задач в условиях частичной неопределенности и жестких временных ограничений. Это определяет целесообразность использования для решения задач методов искусственного интеллекта, позволяющих достигать высокой оперативности принятия решения за счет распараллеливания обработки информации, не предъявляя при этом повышенных требований к характеристикам БКУ отдельного КА.

Для решения задачи автономного распределенного планирования применения ОСКА может быть применена технология многоагентных систем. Основным принципом, отличающим данную методологию от классических методов решения комбинаторных задач, является отказ от поиска строго оптимального решения и переход к поиску «хорошего» на основании выбранного критерия оптимальности решения, наилучшего решения из числа просмотренных допустимых.

Таким образом, использование интеллектуальных информационных технологий наряду с традиционными моделями комбинаторной оптимизации в условиях существующих ограничений позволяют решить задачу автономного распределенного управления ОСКА с заданным качеством ее функционирования. При этом использование принципов распределенности и автономности процесса решения позволяет повысить устойчивость процесса управления функционированием ОСКА.

Литература

1. Кудрин, А. И. Очерки полевого учета / А.И. Кудрин. – Выпуск 6. Ценологические исследования. – М.: Центр системных исследований, 1998. – 192 с.
2. Нечетко-логический нейросетевой самообучающийся контроллер / Л.А. Станкевич [и др.] // Материалы 5-й Всероссийской конф. "Нейрокомпьютеры и их применения" (Москва, 17–19 апреля 1999 г.). – М.: Радио и связь, 1999.
3. Тимофеев, А. В. Математическая модель инвариантного восприятия и опознавания по группам преобразований / А.В. Тимофеев // Кибернетика и вычислительная техника. – Киев: Наукова думка, 1973. – С. 48–54.
4. Пономарев, В. М. Модели автоматизированного синтеза оптимальных технологических комплексов гибких производственных систем / В.М. Пономарев, А.А. Лескин, А.В. Смирнов // Методы и системы автоматизации в задачах науки и производства. – М.: Наука, 1986. – С. 36–49.
5. Калинин, В. Н. Состояние информационного взаимодействия первого рода активного подвижного объекта / В.Н. Калинин, Б.В. Култашов // Изв. вузов. Приборостроение. – 1987. – № 2. – С. 12–16.
6. Лебедев, А. А. Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование / А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
7. Баринов, К. Н. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов / К.Н. Баринов, М.Н. Бурдаев, П.А. Мамон. – М., 1975. – 232 с.
8. Мамон, П. А. Баллистическое обеспечение космических полетов / П.А. Мамон, В.И. Половников, С.К. Слезкинский. – Л., 1990. – 622 с.
9. Можаяев, Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем. Теоретико-групповой подход / Г.В. Можаяев. – М., Машиностроение, 1989. – 304 с.
10. Городецкий, В. И. Многоагентные системы: обзор / В.И. Городецкий, А.Н. Лебедев. – СПб: СПИИРАН, 1998. – 47 с.

Методика формирования множества допустимых вариантов применения наземной космической инфраструктуры испытательного космодрома при решении задач запуска малых космических аппаратов

Technique for development of numerous admissible options for use of ground-based space infrastructure of testing site for spacecraft launching based on the scenario of launching small-sized spacecraft

Мосин / Mosin D.

Дмитрий Александрович
(sin-da@mail.ru)

кандидат военных наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского» МО РФ,
начальник кафедры космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки.
г. Санкт-Петербург

Дуга / Duga V.

Вадим Вадимович
(dugavadim@mail.ru)

Первый Государственный испытательный космодром МО РФ,
научный сотрудник научно-испытательного центра.
Архангельская обл., г. Мирный

Банников / Bannikov E.

Евгений Владимирович
(tigroid13991@gmail.com)

Первый Государственный испытательный космодром МО РФ,
начальник отдела научно-испытательного центра.
Архангельская обл., г. Мирный

Ключевые слова: испытательный космодром – testing site for spacecraft launching; малый космический аппарат – small-sized spacecraft; наземная космическая инфраструктура испытательного космодрома – ground-based space infrastructure of testing site for spacecraft launching; вариант применения – application option; запуск космических аппаратов – spacecraft launching.

В статье описана методика, позволяющая сформировать множество вариантов применения наземной космической инфраструктуры испытательного космодрома. Методика состоит из семи основных этапов. Описан разработанный научно-методический аппарат, позволяющий сформировать множество допустимых по двум критериям вариантов применения. Данными критериями являются оперативность и стоимость, причем оперативность отражает требования основ государственной политики до 2030 года, а стоимость диктуется условиями рыночной экономики.

This article describes technique enabling development of numerous admissible options for application of ground-based space infrastructure of testing site for spacecraft launching. The technique consists of seven main stages. The developed scientific and methodological approach enabling design of numerous admissible options based on two criteria of application scenarios has been described. These criteria are operability and cost, whereby operability reflects the requirements of Basic Principles of State Policy until 2030, and cost is determined by the conditions of market-driven economy.

Введение

Успехи современной микроэлектроники приводят к миниатюризации различных компьютерных систем, используемых в повседневной жизни. Это не может не сказываться на космических технологиях. Именно этот фактор миниатюризации технологий приводит к тому, что всё чаще при запусках космических аппаратов (КА) можно услышать приставку «малый». [2–4,11] Так как современный парк ракет-носителей (РН) и объекты наземной космической инфраструктуры (НКИ) ориентированы в основном на тяжелые и средние КА, несомненно актуальным выглядит вопрос интеграции перспективных малых космических аппаратов (МКА) в существующую систему средств выведения.

На настоящий момент в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского на кафедре «Космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки» проводится комплекс исследований, посвященных МКА. В апреле 2016 года проведена Всероссийская НПК, посвященная «Проблемам создания и применения МКА и робототехнических средств в интересах ВС РФ» [6], в рамках международных военно-технических форумов «Армия-2015» и «Армия-2016» проведены заседания круглых столов, посвященных МКА.

Одной из важнейших задач в рамках данного направления является «Создание системы оперативного развертывания и восполнения орбитальных группировок (ОГ) космических систем (КС) на основе МКА». Обеспечение выполнения данной задачи является неотъемлемым условием для достижения целей эффективного создания и применения КС на базе МКА для решения задач воздушно-космической обороны страны [8].

Одновременно на современном этапе развития ракетно-космической техники (РКТ) создание системы оперативного развертывания и восполнения ОГ КС на основе МКА представляется задачей выбора рационального варианта применения существующей НКИ испытательного космодрома (ИК). Так как энергетических возможностей существующих ракетно-космических комплексов (РКК) для выполнения задач по запуску МКА более чем достаточно, на первый план в данном вопросе выходит экономическая целесообразность и количественная составляющая ракет космического назначения (РКН). При этом для рационального выбора варианта применения НКИ ИК необходимо сформировать множество вариантов применения НКИ ИК. Таким образом, возникает задача по разработке методики формирования множества допустимых вариантов применения НКИ ИК при решении задач запуска МКА.

Разработка методики

Далее приведена методика, в которой происходит формирование массива исходных данных, оценка на допустимость по двум показателям: оперативность и стоимость, и формирования методом полного перебора перечня допустимых вариантов применения НКИ ИК. Время подготовки космических средств (КСр) является строго детерминированной величиной и описывается сетевыми графиками в эксплуатационной документации [4, 5], поэтому данная величина, как и сам процесс в данной статье не рассматривается.

Отдельной, весьма важной и трудоемкой задачей является формирование массива исходных данных для методики формирования множества вариантов применения НКИ ИК. И если количество МКА, необходимых для восполнения национальной орбитальной группировки (ОГ), должно приходиться в качестве исходных данных от вышестоящих звеньев управления, то учет характеристик, присущих НКИ ИК, необходимо учитывать специалистам ИК. Именно правильное формирование массива исходных данных позволит с достаточной степенью достоверности сформировать множество допустимых вариантов применения НКИ ИК для последующего определения предпочтительного варианта по одному из частных показателей качества.

Блок формирования массива исходных данных состоит из двух этапов:

- формирование множества потребного количества КА;

- формирование множества объектов НКИ ИК, необходимых для подготовки и запуска КА.

1. Формирование массива исходных данных.

1.1 Формирование множества КА, обладающих следующими характеристиками, $A = \{a_i, i = 1 \dots J\}$ где A – множество КА i -го типа;

a_i – КА, имеющий характеристики:

$$a_i = \langle m_i, \vec{V}_i, \vec{p}_i \rangle, \quad (1)$$

где: m_i – масса КА; \vec{V}_i – габаритные характеристики; \vec{p}_i – параметры орбиты.

1.2 Формирование множества объектов НКИ ИК $B = \{B_1, B_2\}$, где B_1 – множество РКК (КРК) на ИК, B_2 – множество заправочных станций (ЗС) на ИК.

Множество B_1 – характеризуется следующим выражением:

$$B_1 = \{b_j^1, j = 1 \dots J\}, \quad (2)$$

где: j – порядковый номер РКК; b_j^1 – РКК, обладающие рядом разнородных характеристик.

Так как у РКК (КРК) основными вариативными характеристиками, отражающими эффективность, являются: виды РКН входящих в состав РКК, и технические готовности, в которых находятся КСр, то будет верно выражение:

$$b_j^1 = \langle n_1, n_2 \rangle, \quad (3)$$

где: n_1 – перечень РКН, входящих в состав РКК; n_2 – перечень технических готовности, в которых могут находиться КСр.

Множество B_2 – характеризуется следующим выражением:

$$B_2 = \{b_j^2, j = 1 \dots J\} \quad (4)$$

где: b_j^2 – ЗС, обладающие рядом разнородных характеристик.

2. Формирование варианта применения НКИ ИК

Следующим этапом необходимо сформировать вариант применения НКИ ИК. Он в свою очередь состоит из групп материальных объектов и их характеристик.

В состав варианта применения НКИ ИК входят:

- количество мест подготовки КСр (П);
- наряд космических средств (Н);
- количество мест хранения КСр (Х);
- количество личного состава, необходимого для проведения подготовки и запуска КСр (Л);
- перечень готовностей, в которых содержатся КСр (Г);
- количество КРТ, необходимого для подготовки КСр (Т);
- запас КРТ, который возможно хранить на ИК (З);
- объем КРТ, который необходимо доставить для выполнения поставленной задачи (Д).

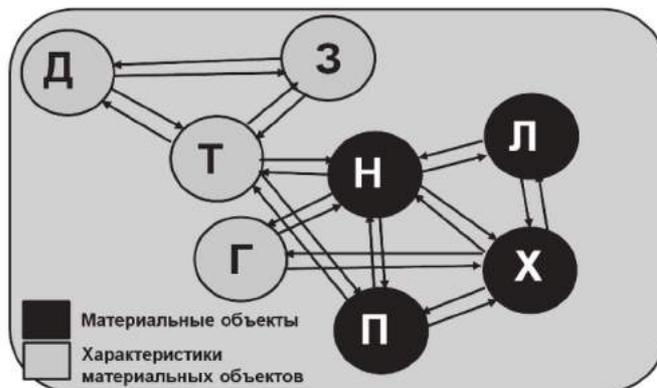


Рис. 1. Взаимосвязь элементов в варианте применения НКИ ИК

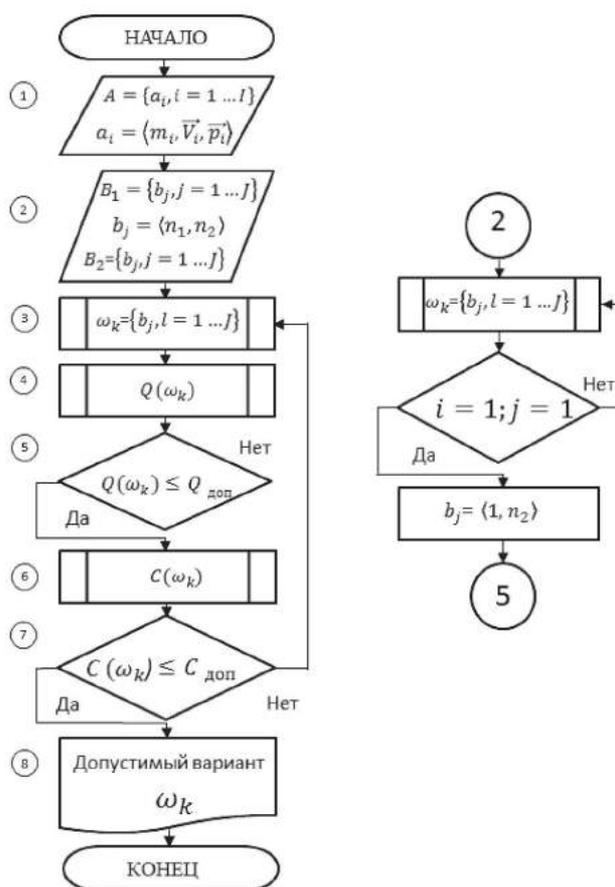


Рис. 2. Схема методики формирования допустимого варианта применения НКИ ИК

Взаимосвязь данных элементов показана на рис. 1:

3. Кроме того, необходимо рассмотреть вариант, в котором количество КА и количество РКК будут равны 1. Очевидно, что в случае если количество КА и количество РКК равно 1, вариативными являются лишь варианты содержания в готовности КСр, проходящих подготовку на ТК (СК), входящих в состав данного РКК.

4. Далее необходимо оценить возможности НКИ ИК в соответствии с методикой оценивания показателей эффективности НКИ ИК по решению задач запуска МКА. Исходными данными (ИД) для «методики оценивания эффективности...» будут являться ИД уже используемые для данной методики.

5. После нахождения оперативности применения НКИ ИК $Q(\omega_k)$ необходимо сравнить показатель оперативности с его допустимым значением [7].

$$Q(\omega_k) \leq Q_{дон}$$

6. Следующим фильтром в данной методике является ресурсоемкость. Необходимо рассчитать количественную характеристику затрат на запуск потребного объема КСр с помощью методики расчета затрат, разработанной МГТУ имени Баумана [8].

7. После нахождения показателя ресурсоемкости $C(\omega_k)$ необходимо сравнить его с допустимым значением $C(\omega_k) \leq C_{дон}$.

В случае соответствия условиям допустимости, следующим этапом становится получение допустимого варианта применения НКИ ИК, в случае несоответствия по любому из показателей, необходим возврат к блоку формирования варианта.

Схема методики формирования допустимого варианта применения НКИ ИК представлена на рис. 2.

Заключение

Повышение возможности НКИ ИК – ключевое звено в обеспечении гарантированного доступа в космос. Кроме того, решение данного вопроса выпало на время, когда экономика страны испытывает некоторые сложности. В условиях, когда с одной стороны необходимо наращивать возможности сил запуска, а с другой – делать это необходимо с минимальными экономическими затратами, создание методики формирования множества допустимых вариантов применения НКИ ИК, которая в ходе использования позволит получить предпочтительный вариант увеличения возможностей НКИ ИК, более чем актуальна.

Ракетные комплексы, стоящие на вооружении в РВСН и обеспечивающие существование фактора ядерного сдерживания, с развитием сил и средств противоракетной обороны приходится обновлять. На настоящий момент идет разработка и испытание ряда перспективных ракетных комплексов, которые поступят на вооружение уже в ближайшие годы. По мере замены комплексы, находящиеся на вооружении, будут выводиться в запас с перспективой последующей утили-

зации. Утилизация единиц данного типа вооружения требует серьезных финансовых затрат, вместе с тем при применении их в конверсионных программах возможно обеспечить требуемый уровень оперативности выведения ОГ МКА, что, в свою очередь, обеспечит выполнение главной задачи, сформулированной в основах государственной политики в области космоса до 2030 года – гарантированного доступа в космос [10].

Литература

1. Дуга, В. В. Основные тенденции развития малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли / В. В. Дуга, Д. Н. Каптельцев // Сборник трудов XX НПК ГИКЦ имени Г. С. Титова, 2015. – Краснознаменск. – С 24 – 27.
2. Дуга, В. В. Современное состояние развития малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли / В. В. Дуга, И. В. Федоров // Сб. науч. трудов VI НТК «Инновационный арсенал молодежи», 2015. – СПб. – С. 100–102.
3. Дуга, В. В. Сравнительный анализ характеристик отечественных и зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования земли / В. В. Дуга // Сб. науч. трудов V НТК «Инновационный арсенал молодежи», 2014. – СПб. С. 98–101.
4. Инструкция по подготовке на СК 14А14АДИС.372182.001ИЭ–11. Издание 1. – 71 с.
5. Инструкция по подготовке на ТК 14А14АДИС.372182.001ИЭ–10. Издание 1. – 71 с.
6. Малые космические аппараты – инструмент решения задач воздушно-космической обороны: отчет о проведении круглого стола / МВТФ «Армия-2016». – М., 2016. – 9 с.
7. Методика оценки возможностей испытательного космодрома при выведении орбитальных группировок малых космических аппаратов: отчет о НИИР (промежуточ.): 27-35/1 ГИК МО РФ; рук. Зотов А.С.; исполн.: Дуга В.В. – Мирный., 2016. – 58 с. – Инв. №373/НИЦ.
8. Методика расчета себестоимости работ при оказании услуг по обеспечению космической деятельности / Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – М., 2001. – 157 с.
9. Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах вооруженных сил Российской Федерации: решение всероссийской НПК ВКА имени А. Ф. Можайского. – СПб., 2016. – 8 с.
11. Трошин, Е. В. Космические системы на базе сверхмалых аппаратов – новый класс систем / Е. В. Трошин // 8-й Международный форум «Высокие технологии XXI века. ВК «Экспоцентр». – М., 2009.
10. Российская Федерация. Приказы. Основные положения государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу: приказ президента РФ: [утв. Президентом РФ от 19.04 2013] – М.: – 11 с. – Пр-906.

ИНФОРМАЦИЯ и КОСМОС

194100, Санкт-Петербург, Кантемировская, 5; тел.: (812) 740-77-07; www.infokosmo.ru

Уважаемые господа!

Целью нашего издания является ознакомление читателей с фундаментальными направлениями в науке и технике, с новыми передовыми связными, геоинформационными и космическими технологиями.

Журнал содержит пять тематических разделов:

«Радиотехника и связь», «Информатика, вычислительная техника и управление», «Геоинформатика», «Авиационная и ракетно-космическая техника», «Философия информации».

В каждом разделе подробно рассматриваются важнейшие аспекты данного направления, а также освещаются последние достижения в мире науки. Авторами статей являются доктора и кандидаты наук, аспиранты и молодые специалисты различных отраслей науки и техники, промышленности. Большое внимание также уделяется вопросам нравственного развития личности, информационным аспектам культуры и духовности. Нашей аудиторией являются руководители и ведущие специалисты научно-технических организаций, принимающие решения, оценивающие перспективы внедрения новых технологий, а также разработчики и поставщики оборудования, преподаватели и аспиранты высших учебных заведений РФ. Журнал выходит ежеквартально.

ПОДПИСКУ ВЫ МОЖЕТЕ ОФОРМИТЬ
через каталог «Издания органов научно-технической информации»
агентства «Роспечать», индекс – **61890**,
стоимость подписки на год – **1400** рублей за 4 номера.

Извещение	<p style="text-align: right;">Форма №ПД-4</p> <p>СПБ НТОО «Институт телекоммуникаций» (наименование получателя платежа)</p> <p>7802077561 (ИНН получателя платежа) 40703810613000000231 (номер счета получателя платежа)</p> <p>в Филиал ОПЕРУ ОАО Банк ВТБ в Санкт-Петербурге г. Санкт-Петербург БИК: 044030704 (наименование банка получателя платежа)</p> <p>Номер кор./сч. банка получателя платежа: 30101810200000000704</p>
	<p>Ф.И.О. плательщика _____ (наименование платежа) _____ (номер лицевого счета (код) плательщика)</p> <p>Адрес плательщика _____</p> <p>Сумма платежа (в т.ч. НДС): _____ руб. _____ коп. Сумма платы за услуги: _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого: _____ руб. _____ коп. " " _____ 200 г.</p> <p>С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____</p>
Кассир	
Квитанция	<p style="text-align: right;">Форма №ПД-4</p> <p>СПБ НТОО «Институт телекоммуникаций» (наименование получателя платежа)</p> <p>7802077561 (ИНН получателя платежа) 40703810613000000231 (номер счета получателя платежа)</p> <p>в Филиал ОПЕРУ ОАО Банк ВТБ в Санкт-Петербурге г. Санкт-Петербург БИК: 044030704 (наименование банка получателя платежа)</p> <p>Номер кор./сч. банка получателя платежа: 30101810200000000704</p>
	<p>Ф.И.О. плательщика _____ (наименование платежа) _____ (номер лицевого счета (код) плательщика)</p> <p>Адрес плательщика _____</p> <p>Сумма платежа (в т.ч. НДС): _____ руб. _____ коп. Сумма платы за услуги: _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого: _____ руб. _____ коп. " " _____ 200 г.</p> <p>С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____</p>
Кассир	

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

Алексеев В. Ф.
доктор технических наук, доцент

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

Дворников С. В.
доктор технических наук, профессор

Замарин А. И.
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Зюзин А. В.
доктор технических наук, профессор

Иванов К. М.
доктор технических наук, профессор

Комашинский В. И.
доктор технических наук, доцент

Крячко А. Ф.
заслуженный работник ВПО РФ,
доктор технических наук, профессор

Курносос В. И.
заслуженный работник высшей школы РФ,
действительный член РАЕН, член-корреспондент МАИ,
доктор технических наук, профессор

Осадчий А. И.
доктор технических наук, профессор

Осипов Г. К.
доктор географических наук, профессор

Попов Д. И.
доктор технических наук, профессор

Смагин В. А.
заслуженный деятель науки РФ,
действительный член МАИ,
доктор технических наук, профессор

Сосунов Б. В.
лауреат Премии Правительства РФ,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Филатов В. Н.
действительный член АИИ им. А. М. Прохорова
доктор военных наук, профессор

Храмов В. Ю.
доктор технических наук, доцент

Цветков К. Ю.
доктор технических наук, профессор

Ясинский С. А.
доктор технических наук, доцент

Яшин А. И.
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

**По вопросам сотрудничества,
пожалуйста, обращайтесь в отдел маркетинга
по номеру +7 (812) 740-77-07
или по электронной почте marketing@itain.ru**

Заместитель главного редактора
Аванесов М. Ю.

Начальник отдела маркетинга
Петров А. А.

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>
Подписной индекс агентства
«Роспечать» – 61890

Журнал зарегистрирован в государственном
комитете РФ по печати.
Регистрационный номер: ПИ № ФС77-26926
от 19 января 2007 г.
Тираж 1500 экземпляров
Дата выхода: 20.12.2018

При использовании материалов ссылка
на журнал «Информация и Космос»
обязательна.

Мнение редакции может не совпадать
с мнением авторов.

За содержание рекламных материалов
несут ответственность рекламодатели.

Отпечатано в ООО
"Типографский комплекс "Девиз"
Санкт-Петербург, ул. Трефолева, 2, лит.БЕ
тел. (812) 335-18-30, www.npt.ru
Свободная цена