АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ «КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА, ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ» ИМ. А.Г. ИОСИФЬЯНА» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ. ТРУДЫ ВНИИЭМ

Главный редактор: генеральный директор, д. т. н. Л. А. МАКРИДЕНКО

Редакционная коллегия: д. т. н. В. П. Верещагин, д. т. н. С. Н. Волков, д. т. н. В. Я. Геча (зам. главного редактора), к. т. н. А. В. Горбунов, к. ф.-м. н. Т. Б. Дуйшеналиев (Киргизская Республика), д. т. н. А. Б. Захаренко, к. ф.-м. н. С. А. Золотой (Республика Беларусь), д. т. н. С. Г. Казанцев, д. т. н. Н. Д. Карачун, д. т. н. И. В. Минаев, д. т. н. М. Р. Нургужин (Республика Казахстан), к. в. н. А. В. Пинчук, д. т. н. А. П. Сарычев, д. ф.-м. н. **А. П. Тютнев**, д. т. н. А. Ю. Федотов, д. т. н. В. П. Ходненко, А. Б. Алабужева (отв. секретарь редколлегии)

Ответственный редактор: д. т. н. В. Я. Геча

ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА 2017

МАТЕРИАЛЫ

пятой международной научно-технической конференции

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ



МОСКВА 2017

Председатель Оргкомитета

Л. А. Макриденко - генеральный директор АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

Сопредседатели:

М. Н. Хайлов - заместитель руководителя Госкорпорации «Роскосмос»

Л. М. Зеленый – вице президент РАН, директор ИКИ РАН, председатель совета РАН по космосу

Ю. В. Власов – генеральный директор ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация»

О. А. Горшков – генеральный директор ФГУП «ЦНИИмаш» М. Свитинг – генеральный директор SSTL

М. Е. Яковенко - заместитель руководителя «Росгидромета»

П. А. Витязь – руководитель аппарата НАН Беларуси

М. Р. Нургужин – президент АО «НК «Казакстан Гарыш Сапары»

Оргкомитет:

С. Н. Волков – первый заместитель генерального директора АО «Корпорация «ВНИИЭМ» М. В. Новиков – главный конструктор АО «Корпорация «ВНИИЭМ»
В. А. Алтухов – заместитель генерального директора АО «Корпорация «ВНИИЭМ» А. В. Пинчук – ученый секретарь АО «Корпорация «ВНИИЭМ» П. А. Солопов – главный инженер АО «Корпорация «ВНИИЭМ»
И. Ю. Ильина – руководитель пресс-службы АО «Корпорация «ВНИИЭМ» Н. Ю. Филькова – специалист по НТИ АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,

секретарь оргкомитета конференции

Программный комитет:

Л. А. Макриденко – генеральный директор АО «Корпорация «ВНИИЭМ»
 С. А. Золотой – директор УП «Геоинформационные системы» НАН Беларуси
 В. В. Хартов – генеральный конструктор по автоматическим аппаратам и комплексам, заместитель генерального директора – начальник центра системного проектирования ФГУП «ЦНИИмаш»
 А. Н. Кирилин – генеральный директор АО «РКЦ «Прогресс»

В. В. Асмус – директор ФГБУ «НИЦ «Планета»

Ю. А. Рой – генеральный директор АО «НПК «СПП»

А. В. Горбунов - заместитель генерального директора АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

В. Я. Геча – заместитель генерального директора АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

С. А. Лемешевский – и.о. генерального директора ФГУП «НПО им. Лавочкина»

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
Мониторные наблюдения экстремальных процессов природного и техногенного характера в атмосфере Земли и космическом пространстве: результаты экспериментов на спутнике «Ломоносов» и проект «Универсат» В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, В. М. Липунов, В. В. Богомолов, Е. С. Горбовской, А. Ф. Июдин, В. В. Калегаев, П. А. Климов, В. Г. Корнилов, В. И. Оседло, В. Л. Петров, М. В. Подзолко, Е. П. Попова, С. И. Свертилов, И. В. Яшин, Л. А. Макриденко, Р. С. Салихов, С. И. Терехов, О. С. Графодатский, С. А. Лемешевский, А. С. Кубанкин	7
Требования оперативной океанологии к спутниковым океанологическим системам Э. С. Зубченко, Н. Н. Жильцов	15
Методологический подход к построению системы управления группировками космических аппаратов дистанционного зондирования Земли М. М. Матюшин, Ю. С. Луценко	26
К вопросу обеспечения работы вычислительной системы при одной возможной неисправности А. С. Ананьин, А. Б. Уманский, Г. Е. Яцук	34
К вопросу оценки надежности программного обеспечения в процессе отработки систем управления космическими аппаратами Г. Е. Яцук, А. Б. Уманский, А. С. Ананьин	40
Построение алгоритмов системного взаимного информационного согласования в системах управления группировками КА ДЗЗ и сокращение их временной избыточности И В Ашарица А В Побацов	15
и. Б. Ашарина, А. Б. Лооанов	45
Оценка эффективности комплексов для отработки систем управления Г. Е. Яцук, А. Б. Уманский, А. С. Ананьин, Д. И. Зелизко	54
Обеспечение точности стабилизации перспективного космического аппарата при проведении площадных съемок поверхности Земли А. В. Сумароков, В. Н. Платонов	57
Виртуальная система ориентации в концепции КА «Прибор – Спутник» А. А. Пономарев, Л. Н. Сигал, И. Д. Родионов	64
Анализ приоритетных технических требований к перспективной российской бортовой аппаратуре, решающей задачи мониторинга в ИК-диапазоне спектра Р. В. Андреев, Н. П. Акимов, Ю. М. Гектин, А. А. Зайцев, С. М. Зорин, А. В. Рыжаков, М. Б. Смелянский, Д. О. Трофимов	68

Малогабаритный комплекс оптико-электронной аппаратуры Д33 из космоса А.И.Бакланов	80
К построению радиоинтерфейса спутникового высотомера Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур	87
О получении радиолокационных изображений в системах космического мониторинга по технологии РСА А. Е. Евграфов, В. Г. Поль	97
Предложения по организации информационного обеспечения данными Д33 удаленных потребителей, оснащенных портативными средствами отображения информации индивидуального пользования А. Н. Черный, В. Г. Поспелов Т. А. Арефьева	111
Обзор алгоритмов оценки линейного разрешения на местности по космическим снимкам П. Ю. Орлов, В. В. Некрасов	116
Обзор алгоритмов оценки отношения сигнал/шум по космическим снимкам М. А. Боярчук, В. В. Некрасов	131
Комбинирование данных дистанционного зондирования Земли с данными наземных беспроводных сенсорных сетей в производных информационных продуктах И.Б. Гинзбург, С. Н. Падалко , М. Н . Терентьев	142
Автоматизация задачи мониторинга местности на основе данных дистанционного зондирования Земли А. А. Золотой, А. В. Урбанович	150
Результаты обработки данных бортовой геофизической аппаратуры для выявления сейсмической активности В. О. Скрипачев, И. В. Суровцева А. И. Барсуков А. О. Жуков	159
Разработка методики тематической обработки наземных гиперспектральных оптических измерений сельскохозяйственных культур на кубанском полигоне В. А. Третьяков, А. А. Ризванов, Р. Ю. Данилов,	1(0
И. А. КОСТЕНКО, В. Л. ИСМАИЛОВ	168
Инженерные решения для территориального планирования с помощью ДЗЗ и IT Л. А. Ведешин, А. И. Корнейчук, В. И. Семенов	178
Развитие алгоритмов обработки и применения информации, получаемой с гиперспектральной аппаратуры КА Т. А. Арефьева, М. С. Саратовских, А. В. Кузнецов	186
Космический мониторинг геополитического пространства Л. А. Ведешин, А. И. Корнейчук, В. И. Семенов	191

Исследование возможности использования литий-ионных аккумуляторов NCR18650В при создании батарей для систем электроснабжения космических аппаратов	
А. И. Груздев, Г. А. Жемчугов	198
Исследование теплообмена в аккумуляторной батарее космического аппарата на основе индустриальных аккумуляторов габарита 18650 А.И. Груздев, С. В. Давыдов, Г. А. Жемчугов, Е. О. Лебедев	202
Исполнительный электропривод устройства поворотного солнечной батареи космического аппарата Д. О. Якимовский, Д. С. Положенцев, Д. Й. Джукич	207
Сравнительный анализ устойчивости батарей в SP- и PS-конфигурациях к отказам литий-ионных аккумуляторов А. И. Груздев, С. В. Давыдов, Г. А. Жемчугов, Е. О. Лебедев	213
Системные подходы и тенденции создания аккумуляторных батарей для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли А. И. Груздев, Г. А. Жемчугов	220
Контроль работоспособности и управление распределенными комплексами автоматической потоковой обработки спутниковых данных	
Д. А. Кобец, А. М. Матвеев, А. А. Прошин, А. А. Мазуров	226

ПРЕДИСЛОВИЕ

Важными и актуальными вопросами космической науки и техники на сегодняшний день являются: развитие космических систем дистанционного зондирования Земли, создание новых, в том числе малых, космических аппаратов, систем наземной обработки космической информации и алгоритмов ее обработки. Эта сфера деятельности жизненно необходима для социально-экономического развития страны, которое все больше зависит от наблюдений Земли из космоса.

На орбите Земли в настоящее время находятся пять космических аппаратов разработки и производства АО «Корпорация «ВНИИЭМ»: космические аппараты дистанционного зондирования Земли «Метеор-М» № 1 и № 2, «Канопус-В», БКА и научный космический аппарат «Ломоносов», который был успешно выведен на орбиту в 2016 году. Платформа этого космического аппарата, разработанная и изготовленная нашим предприятием, и все служебные системы работают без замечаний.

Наше предприятие, как и вся космическая отрасль, планирует наращивание космической группировки дистанционного зондирования Земли: в ближайших планах запуск космических аппаратов «Метеор-М» № 2-1, «Канопус-В-ИК», запуск еще пяти космических аппаратов этих типов.

В этом году на орбиту планируется вывести три космических аппарата дистанционного зондирования Земли со всех космодромов России: Восточного, Байконура и Плесецка.

В целом по отрасли к 2020 г. планируется иметь на орбите двадцать семь действующих космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, а также наращивание группировки радиолокационных спутников, что особенно важно для России, около одной трети территории которой постоянно закрыто облаками.

Таким образом, тема конференции, которая проводилась 25 мая 2017 года в пятый раз, действительно является актуальной и крайне важной на сегодняшний день для космической сферы деятельности и для всей страны в целом.

Генеральный директор АО «Корпорация «ВНИИЭМ», доктор технических наук Л. А. Макриденко

МОНИТОРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СПУТНИКЕ «ЛОМОНОСОВ» И ПРОЕКТ «УНИВЕРСАТ»

В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, В. М. Липунов, В. В. Богомолов, Е. С. Горбовской, А. Ф. Июдин, В. В. Калегаев, П. А. Климов, В. Г. Корнилов, В. И. Оседло, В. Л. Петров, М. В. Подзолко, Е. П. Попова, С. И. Свертилов, И. В. Яшин («Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»), Л. А. Макриденко, Р. С. Салихов, С. И. Терехов (АО «Корпорация ВНИИЭМ»), О. С. Графодатский, С. А. Лемешевский (АО «НПО им. С. А. Лавочкина»), А. С. Кубанкин («Белгородский государственный национальный исследовательский университет»)

Аннотация. Рассматриваются результаты экспериментов на спутнике «Ломоносов» в части исследования экстремальных явлений в атмосфере Земли и космическом пространстве, в том числе высотных электромагнитных разрядов и космических лучей. Также рассматривается новый университетский космический проект «Универсат-СОКРАТ». Цель проекта – создание группировки спутников для мониторинга в реальном времени в околоземном космическом пространстве: радиационной обстановки; потенциально – опасных объектов естественного (астероиды, метеоры) и техногенного происхождения (космический мусор), а так же электромагнитных транзиентов – космических и атмосферных гамма-всплесков, вспышек оптического и ультрафиолетового излучения из атмосферы Земли.

Ключевые слова: спутник, космический эксперимент, мониторинг, экстремальные явления, атмосфера Земли, космическое пространство, транзиенты, радиация, астероиды, метеоры, космический мусор.

Введение

Естественная и «техногенная» космическая среда создает серьезные риски для осуществления космических миссий как роботизированных, так и с участием человека. Риск определяется спецификой планируемых миссий – их продолжительностью, локализацией в космическом пространстве и параметрами орбит.

Специфика природных условий в космическом пространстве (многообразие физических параметров радиационных полей, особенности баллистических траекторий природных космических объектов), а также последствия космической деятельности человека в космосе (загрязнение космического пространства техногенным мусором) создают, как правило, реальные трудности для их моделирования и расчетов рисков. Мониторинг в реальном времени космических природных и техногенных объектов – потенциальных угроз – представляет собой оптимальный и эффективный способ снижения рисков.

Отдельно следует отметить возможную опасность электромагнитных транзиентов, в том числе регистрируемых из атмосферы Земли. Транзиентные электромагнитные явления в верхней атмосфере (десятки км) наблюдаются в различных диапазонах длин волн – от гамма-диапазона до инфракрасного. Наиболее часто наблюдающиеся – транзиентные световые явления (TLE) – проявляются везде – от авроральных широт до экваториальных.

Потенциальную опасность из космоса представляют космические гамма-всплески (КГВ). Эффект воздействия редких мощных гамма-всплесков на атмосферу Земли может привести к катастрофическим последствиям и мало изучен.

Исследование экстремальных явлений во Вселенной и в том числе мониторные наблюдения потенциально опасных явлений в атмосфере земли и ближнем космосе является одной из основных задач экспериментов на спутнике «Ломоносов».

Научная аппаратура на спутнике «Ломоносов» включает инструмент ТУС, предназначенный для регистрации треков широких атмосферных ливней (ШАЛ) от космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) по ионизационному свечению, а также комплекс приборов для изучения КГВ, в том числе гаммадетекторы БДРГ, оптические камеры широкого поля зрения ШОК и ультрафиолетовый (УФ) и рентгеновский телескоп UFFO. Все приборы работают в режиме непрерывных измерений, поэтому обеспечивается возможность одновременной регистрации событий, в том числе в оптическом, УФ, рентгеновском и гамма-диапазонах. Предусмотрен оперативный сброс информации о зарегистрированном гамма-всплеске в сеть GCN, также, как и возможность контроля событий по данным наземных установок, регистрирующих КЛПВЭ (им. Оже, ТА), нейтрино высоких энергий (IceCube, ANTARES), гравитационные волны (LIGO).

Детектор «ТУС» на спутнике «Ломоносов»

Орбитальный телескоп «ТУС» является первым в мире прибором, предназначенным для регистрации треков космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ, частиц с энергией больше 7·10¹⁹ эВ) в атмосфере Земли с борта искусственного спутника [1]. Детектор является частью научной аппаратуры спутника «Ломоносов», запущенного 28 апреля 2016 г. с космодрома Восточный на солнечно-синхронную орбиту высотой ~500 км.

«ТУС» представляет собой телескоп-рефлектор, состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади (2 м²), предназначенного для сбора и фокусировки слабого сигнала флуоресценции, порождаемой в процессе развития в атмосфере пирокого атмосферного ливня (ШАЛ), и фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости зеркала. Фотоприемник представляет собой матрицу из 256 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) типа Hamamatsu R1463 с соответствующей электроникой. Использование большого зеркала-концентратора и ФЭУ позволяет достичь высокой чувствительности прибора и достаточного для регистрации ШАЛ временного разрешения (менее 1 мкс). Поле зрения одной ячейки детектора равно 0,01 рад. Телесный угол обзора ячейки составляет 10⁻⁴ стер, что в атмосфере соответствует наблюдению квадрата 5 км × 5 км при высоте орбиты 500 км. Все поле зрения детектора составляет $\pm 4,5$ град (80 км × 80 км на поверхности Земли) [1].

Перед каждым ФЭУ матрицы фотоприемника расположены светофильтр УФС-1 (диаметр 13 мм, толщина 2,5 мм), который ограничивает регистрируемое излучение в диапазоне длин волн 300 – 400 нм, световод, который собирает свет с квадратного входного окна ячейки (15 мм × 15 мм) на круглый фотокатод ФЭУ (13 мм) и бленда, предназначенная для защиты от боковой засветки. Световод и бленда изготовлены из алюминия.

Детектор «ТУС» использует для измерения всю атмосферу в качестве гигантской мишени, в которой при попадании частицы развивается ШАЛ. Тем самым удается значительно увеличить площадь обзора даже по сравнению с самыми крупными наземными установками, такими как Обсерватория Пьера Оже в Аргентине и Telescope Array в США [2, 3]. Важным преимуществом орбитального телескопа является практически равномерная экспозиция по всей небесной сфере, что является важным фактором при исследовании анизотропии КЛ ПВЭ и зависимости вида энергетического спектра от направления прихода космических лучей.

За счет алгоритмов последовательного цифрового интегрирования сигнала детектор может работать в режимах с разным временным разрешением: 0,8 мкс, 25,6 мкс, 0,4 мс и 6,6 мс. Это позволяет исследовать транзиентное УФ-свечение атмосферы разной длительности и природы: от широких атмосферных ливней, молниевых разрядов, транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ) до метеоров и антропогенных источников.

Одним из наиболее часто встречающихся высокоатмосферных явлений, длительностью менее 1 мс, является эльв – расширяющееся световое кольцо на высоте 80 – 90 км, связанное с нагревом ионосферы при распространении электромагнитного импульса от молнии облако-земля [4]. На рис. 1 представлен пример измерения такого события детектором «ТУС» 18 сентября 2016 г. Отчетливо видно быстрое движение кольцеобразного объекта в поле зрения прибора.

Для всех событий типа эльф был проведен совместный анализ с наземной сетью регистрации молний Vaisala GLD360 [5]. Для каждого события обнаружен грозовой очаг, расположенный в центре видимого кольца и определена родительская молния с амплитудой тока обратного удара, превышающей 60 кА.



Рис. 1. Движение изображения события типа эльв по матрице фотоприемника. Слеванаправо карты каналов в моменты времени *t* = 0,077 мс, 0,182 мс, и 0,174 мс от начала осциллограммы. Цветом показана амплитуда сигнала в относительных единицах

В режиме работы с временным разрешением 6,6 мс возможна запись осциллограмм общей длительностью до 1,7 с. В некоторых событиях наблюдается длительная серия мощных импульсов. На рис. 2, слева, приведен пример такого измерения в грозовой районе. Узкие высокие пики – обратные удары молний, а УФ-свечение между ними – предмолниевое свечение облаков и отклик в верхних слоях атмосферы (ТАЯ). На правой части рисунка показано другое событие, которое отличается по временной структуре (отсутствуют короткие пики). Оно произошло вдали от гроз (расстояние более 300 км) по данным сети Vaisala GLD360.



Рис. 2. Слева: серия УФ-вспышек над грозой, острые пики – молниевые разряды. Справа: внегрозовое событие (данные о молниевых событиях наземной сети Vaisala GLD360)

Регистрация космических лучей низких энергий детектором «ТУС»

Один из первых эффектов, обнаруженных за время работы прибора, – регистрация очень коротких и мощных импульсов, происходящих в нескольких соседних каналах фотоприемника. На временной осциллограмме этот сигнал представляет собой острый пик, происходящий одновременно в нескольких ячейках фотоприемника с быстрым спадом в начале (с постоянной времени анодной цепи ~ 0,6 мкс) и затем – в большинстве случаев – более медленным спадом сигнала с постоянной времени порядка 10 мкс. Как правило, ячейки с такими импульсами образуют линейную структуру на фотоприемнике (трек).

На рис. З показан пример импульса и геометрия события на фотоприемнике. Предположительно, это эффект регистрации низко энергичных (от нескольких сот МэВ до нескольких ГэВ) космических частиц, которые, попадая в фотоприемник, производят оптический сигнал в стеклянных частях детектора (светофильтрах, входных окнах ФЭУ). Широтное распределение таких событий (рис. 4) демонстрирует увеличение числа событий с географической широтой, что свидетельствует в пользу гипотезы о связи этих импульсов с протонами указанных энергий.



Рис. 3. Пример события с одновременным сигналом в нескольких ФЭУ, выстроенных в трек: временной профиль события (*a*); трек на фотоприемнике (*б*). На рисунке (*a*) по оси абсцисс отложено время в единицах 0,8 мкс, по оси ординат – значение сигнала аналогоцифрового преобразователя (АЦП). На рисунке (*б*) по осям отложены координаты ячеек матрицы фотоприемника, значения сигнала АЦП представлены шкалой серого цвета. На рисунке (*в*) показан расчетный трек протона с энергией 1 ГэВ в фотоприемнике. Стрелкой показано направление движения протона



Рис. 4. Слева – распределение всех измерений в режиме ШАЛ по широте (светло-серая гистограмма), темно-серая гистограмма – широтное распределение коротких импульсов от частиц. По оси абсцисс отложена географическая широта (положительная к северу от экватора, отрицательная к югу). По оси ординат отложено число событий в соответствующем бине. Справа: карта 869 событий с короткими импульсами (жирные точки), обычные точки – все остальные события на ночной стороне орбиты)

Проект «Универсат-Сократ»

Дальнейшее исследование потенциальных угроз в космическом пространстве и верхней атмосфере предполагается осуществлять в новом проекте МГУ имени М.В. Ломоносова УНИВЕРСАТ-СОКРАТ.

Основными задачам проекта являются:

 Оперативная (в реальном времени) оценка радиационных условий в околоземном космическом пространстве для оценки радиационных рисков выполнения космических миссий и выработки алертных сигналов для принятия решений по их управлению.

 Верификация современных расчетных моделей полей радиации околоземного космического пространства.

 Оперативный контроль потенциально – опасных объектов естественного и техногенного происхождения в околоземном пространстве.

 Контроль электромагнитных транзиентов в верхней атмосфере Земли и космическом пространстве (гамма-всплески, солнечные вспышки).

Для реализации указанных задач предполагается использовать группировку низковысотных бюджетных космических аппаратов с параметрами орбит, охватывающих весь пространственный диапазон существования захваченной в магнитное поле радиации (радиационных поясов). При этом должна быть разработана методика измерений всенаправленных потоков захваченных частиц с

12

последующей модельной интерполяцией и экстраполяцией измеренных потоков на всю область радиационных поясов и дать техническое предложение по аппаратуре для регистрации заряженных частиц. С целью мониторинга космической радиации. Также должная быть разработана методика наблюдений за потенциально – опасными объектами естественного и техногенного происхождения в околоземном пространстве, разработана методика наблюдений электромагнитных транзиентов земного и космического.

Аппаратура для мониторинга космической радиации должна включать комплекс телескопов – спектрометров электронов на диапазон энергий 0,15 – 10 МэВ и протонов на диапазон энергий от 2 до >160 МэВ. Для измерения всенаправленных потоков частиц должно использоваться несколько телескопов с разнесенными в пространстве осями.

Комплекс научной аппаратуры для оптического мониторинга опасных объектов представляет собой две широкопольные оптические камеры (мини-телескопы) с полем зрения ~20×40 градусов, 12 мегапикселей, ПЗС матрицы 24×36 мм. Данные с каждой камеры анализируются процессором, осуществляющим как подробную запись видеоряда (5 кадров в секунду) по триггеру от гамма-детектора или др. прибора (гамма-всплески), так и выборку видеофрагментов, относящихся к космическим аппаратам, космическому мусору, астероидам и др. объектам. При этом предполагаются совместные наблюдения с наземной сетью робот-телескопов «Мастер».

Комплекс научной аппаратуры для изучения тразиентных атмосферных явлений должен состоять из двух-трех широкоугольных телескопов с полем зрения у каждого $\pm 20^{\circ}$ для регистрации ТАЯ во всем поле зрения возможного события ТАЯ с выходом электронов в магнитосферу. Поле зрения ±60° позволит наблюдать глобальную картину такого события вдоль геомагнитного меридиана. Комплекс также должен включать детектор заряженных частиц с высоким временным разрешением (менее 1 мс) для регистрации быстрых всплесков потоков релятивистских электронов, генерированных в ТАЯ и захваченных геомагнитным полем, а также пространственно-чувствительный спектрометр ТАЯ с высоким временным разрешением для измерения спектра оптического излучения ТАЯ и молний. Молниевый разряд будет отличаться от ТАЯ по присутствию линии 777 нм и по отсутствию линии 762 нм. В состав комплекса должна входить инфракрасная видеокамера для наблюдения наличия облачного покрова и определению его высоты в области регистрации ТАЯ. Данные камеры работающей одновременно с детекторами ТАЯ позволят проверить сведения о ТАЯ вне грозовых и облачных районов, полученные на спутнике Татьяна-2, а также детектор УФ- и ИК-излучения (аналог детектора на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов» для сравнения данных нового КЭ с данными предыдущих.

В состав комплекса научной аппаратуры для мониторинга в гамма-диапазоне должны входить:

1. Широконаправленные сцинтилляционные детекторы гамма-излучения для обзора неба в диапазоне 10 – 5000 кэВ: 6 детекторов диаметром 100 мм, составляющие 2 тройки взаимно перпендикулярных детекторов, осматривающих верхнюю небесную полусферу, позволяющих определять положение источника всплеска гаммаизлучения с точностью до нескольких градусов.

2. Гамма-телескоп с кодирующей маской. Эффективная площадь ~100 см², диапазон энергий 50 − 5000 кэВ (в режиме кодирования 50 − 1000 кэВ), угловое разреше-

13

ние ~1 градус, поле зрения полного кодирования +/-45 градусов. Гамма-телескоп дает возможность проводить проверку появления точечного источника и, таким образом, отделять гамма-всплески различной природы от высыпаний частиц.

3. Блок анализа данных содержит узлы цифровой электроники, позволяющие вести запись показаний с высоким временным разрешением (до 10 микросекунд), проводить оперативный анализ изображений с телескопа с кодирующей маской, а также вырабатывать триггер гамма-всплеска.

Успешная реализация проекта позволит:

 Впервые в мире создать прообраз космической системы мониторинга и предотвращения космических угроз как для осуществляемых, так и планируемых космических миссий, включая высотные атмосферные летательные аппараты.

2. Создать новые инновационные технологии в области приборостроения и методы решения информационных задач в реальном масштабе времени.

 Разработать новые образовательные стандарты и методы подготовки специалистов в новой сфере прикладных космических исследований.

4. Укрепить международное сотрудничество в космических исследованиях.

Литература

1. Garipov G. K. et al. Space experiment TUS on board the Lomonosov satellite as path-finder of JEM-EUSO // Experimental Astronomy. 2015. - V. 40. - P. 315 - 326.

2. Aab A. et al.//NIM A. 2015. - V. 798. - P. 172. doi:10.1016/j.nima.2015.06.058.

3. Fukushima M. // EPJ Web of Conferences. – 2015. – V. 99. – P. 04004. doi:10.1051/epjconf/20159904004.

4. H. Fukunishi, et. al. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere // Geophysical Research Letters, 1996. – V. 23. – P. 2157 – 2160.

5. R. K. Said, et al. Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank // Journal of Geophysical Research (Atmospheres). – 2010. – V. 115(D14). – P. D23108.

ТРЕБОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОКЕАНОЛОГИИ К СПУТНИКОВЫМ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ

Э. С. Зубченко, Н. Н. Жильцов

(АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт»)

Аннотация. В статье на основе анализа целей и задач оперативной океанологии и требований к получению информации о состоянии морской среды обосновываются основные характеристики спутниковой наблюдательной системы и бортовой annaратуры для мониторинга Мирового океана с требуемой пространственной и временной разрешающей способностью. Делается вывод о возможности реализации данных требований на основе анализа уровня разработок технических средств для оснащения современных и перспективных зарубежных спутниковых океанологических систем.

Ключевые слова: оперативная океанология, параметры состояния морской среды, точность, пространственная и временная разрешающая способность, спутниковая система наблюдения Мирового океана, методы дистанционного зондирования Мирового океана, аппаратные средства спутниковой наблюдательной системы, радиометр, радиовысотомер, спектрометр, скаттерометр, радиолокатор с синтезируемой апертурой.

Оперативная океанология становится главным способом информационного обеспечения морской деятельности данными о состоянии морской среды.

Под оперативной океанологией понимают деятельность по выполнению систематических измерений параметров состояния морей, океанов и атмосферы, их обработке, усвоению для оперативной оценки текущего и прогнозированию ожидаемого состояния морской среды, доведения результатов обработки на постоянной регулярной основе для анализа и прогноза гидрофизических и гидродинамических полей в диапазонах пространственно-временной синоптической и мезомасштабной изменчивости¹.

Оперативная океанология критически зависит от возможности оперативного получения данных высокого качества *in situ* и данных дистанционного зондирования с достаточно высокой подробностью и последовательным выбором. Количество, качество и пригодность наборов данных непосредственно определяют качество анализа и прогнозов состояния морской среды и связанных услуг. Эти данные позволяют инициировать, корректировать и подтверждать океанские модели через ассимиляцию в них данных измерения. Сами параметры, измеряемые со спутника с высоким разре-

¹ Мезомасштабные н е о д н о р о д н о с т и (с масштабами от сотен метров до километров и периодами от часов до суток). В этом интервале выделены три подынтервала: внутренние волны, инерционные колебания, приливные колебания на мелководьях; синоптические неоднородности (с масштабами десятки и первые сотни километров и периодами от суток до месяцев). В этом интервале выделены два подынтервала: волны Россби и связанные с ними фронтальные и свободные океанические вихри, вынужденные неоднородности с масштабами баротропных атмосферных процессов.

шением (например, радиационная температура морской поверхности), могут использоваться непосредственно [1].

Это требует наличия глобальной системы наблюдения Мирового океана. Климат и приложения оперативной океанологии разделяют ту же самую базовую систему на основе Глобальной Системы Наблюдения Океана – **GOOS** – Global Ocean Observing System² и Глобальной Системы Наблюдения для Климата – GCOS – Global Observing System for Climate³. Оперативная океанология имеет, однако, специфические требования для измерений, которые рассматриваются ниже.

Спутниковые системы наблюдения обеспечивают непрерывное получение данных с высокой пространственной разрешающей способностью данные по ключевым параметрам состояния океанской среды в глобальном масштабе, таким как высота уровня моря и скорость течения, температура морской поверхности (ТМП), цветность морской воды, характеристики морского льда, волн и приводного ветра. Это основные данные, требуемые для глобальных, региональных и локальных моделей анализа и прогноза состояния океана. Только спутниковые измерения могут, обеспечить наблюдения с высокой пространственной и временной разрешающей способностью, чтобы отслеживать мезомасштабную и прибрежную изменчивость. Спутниковые данные могут также непосредственно использоваться для конкретных применений (например, данные радиолокационного зондирования – для получения характеристик ледовых полей и контроля загрязнения нефтью, данные датчиков цветности океана – для контроля качества воды). Перспективным направлением следует считать получение данных о солености поверхностного слоя.

Главное требование к спутниковым океанологическим системам для оперативной океанологии – они должны обеспечивать непрерывное измерение и передачу данных измерений для последующего анализа и практического использования. Для получения таких данных спутниковая наблюдательная система должна включать несколько спутников, оснащённых специализированными датчиками с достаточными точностью, пространственной и временной разрешающей способностью.

Обобщенные требования оперативной океанологии к информации о состоянии морской среды представлены в табл. 1.

Главные требования к составу аппаратных средств спутниковой наблюдательной системы могут быть сформулированы следующим образом [2]:

– для измерения температуры морской поверхности, необходим спутник, оснащенный радиометром с максимально высокой точностью класса AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer). Для обеспечения всепогодного мониторинга на спутнике необходим также датчик в микроволновом диапазоне (класса AMR-2);

– для мониторинга мезомасштабной циркуляции, для измерений высоты характерных волн необходимо иметь группировку из трех-четырех спутников, оснащенных радиовысотомерами класса *Poseidon-3B*. При этом для возможности формирования референцной поверхности необходим продолжительный период измерений;

² Международное сообщество океанографических наблюдателей и исследователей, которые обменивают информацию и планы, чтобы понять здоровье и будущее Мирового океана.

³ GCOS – организация, учреждённая Всемирной метеорологической организацией, Межправительственной Океанографической Комиссией (МОК) ЮНЕСКО, Программой по охране окружающей среды ООН (*UNEP*) и Международным Советом по Науке (*ICSU*), чтобы оценить и контролировать соответствие океанологических сетей и спутниковых систем наблюдения, и таким образом идентифицировать потребности системы наблюдения в нынешней обстановке.

для возможности мониторинга цветности океанских вод необходимо иметь группировку из двух спутников, оснащенных спектрометрами класса MODIS, MERIS;
 для глобального мониторинга полей приводного ветра с высоком пространственным разрешением необходимо иметь группировку из двух спутников, оснащённых скаттерометрами класса SeaWinds, устанавливавшихся на КА QuikSCAT;

Таблица 1

морекой среды							
Параметры			Погрешность измерения	Диапазон измерений	Частота получения	Время доставки информа- ции	Простран- ственное разреше- ние, км
	1		2	3	4	5	6
гтура по- сти моря	I	Глобальная	1°C	-2÷+35	3 сут	12 — 24 ч	50 - 250
Темпера верхнос	I	Локальная	0,1°C	-2 ÷ +35	1 сут	12 ч	5 - 50
		Высота волны	0,5 м	0-25 м	6ч	3ч	10
нение		Длина волны	10%	6-200 м	6ч	3 ч	10
Волн		1	2	3	4	5	6
		Направление	10 [°]	0-360	6ч	3ч	10
Лед		Толщина	0,1 м	0,1 – 50 м	3 сут	12 ч	0,1
		Возраст (новый, однолетний, многолет- ний)		0 – 1 год	3 сут	12 ч	1
ные	ения	Скорость	0,05м/с	0-3 м/с	1 сут	1 сут	10
(HOCT)	теч	Направление	10°	0-360	1 сут	1 сут	10
овер	deu	Скорость	1 м/с	0-50 м/с	3ч	3ч	10
Ш	Bel	Направление	10°	$0 - 360^{\circ}$	3ч	3ч	10
Океанские приливы		3 –5 см	0 – 10 м	6ч	3ч	20	
Внут	ренн	ие волны	0,5	0 – 10 м	1 сут	1 сут	20
Штор	мовь	ые нагоны	0,05 м	0 – 10 м	1 сут	1 сут	1
Соленос	ть м	орской воды	1%	0 - 40 %	1 сут	1 сут	10

Требования оперативной океанологии к информации о состоянии морской среды

 – для мониторинга волн, ледовых полей и контроля нефтяного загрязнения необходимо иметь группировку из двух спутников, оснащённых радиолокаторами с синтезируемой апертурой класса *Radarsat*-2.

Эти минимальные требования за прошедшие 10 – 15 лет были удовлетворены только частично. Специфические требования оперативной океанологии к спутниковым методам дистанционного зондирования Мирового океана рассматриваются ниже.

Спутниковая альтиметрия – самая существенная составляющая системы наблюдения, требуемая для оперативной океанологии. Она обеспечивает глобальные оперативные всепогодные измерения высоты уровня моря с высоким пространственным и временным разрешением. Уровень моря непосредственно связан с океанской циркуляцией через геострофическое приближение и является также показателем внутреннего состояния океана, позволяющим вывести 4D океанскую циркуляцию через ассимиляцию данных измерений. Высотомеры также измеряют высоты значительных волн⁴, что является существенным для оперативного волнового прогноза. Данные кратных измерений с высоким разрешением позволяют соответственно представлять океанские вихри и связанные течения в моделях [3]. В табл. 2 представлены требования к альтиметрии для оперативной океанологии.

Исходя из приведенных в табл. 2 данных, можно оценить предельные требования к точностным параметрам радиовысотомера: 1) точность измерений – 1 см; 2) пространственная разрешающая способность – 10 – 20 м; 3) частота обновления данных – 2 раза в сутки.

Недостаток существующих спутниковых океанологических радиовысотомерных систем – измерение высоты морской поверхности по одному профилю может быть устранен путем выполнения синхронных измерений несколькими (не менее трёх) радиовысотомерами, установленными на отдельных КА в одной и той же орбитальной плоскости.

Даже при размещении ИСЗ в единой орбитальной плоскости вращение Земли разделяет их надирные трассы. Междутрассовые расстояния пропорциональны расстоянию между ИСЗ. Синхронные точные измерения высот поверхности воды по трём параллельным трассам позволит получить двухмерный градиент высоты морской поверхности [4].

Учитывая опыт использования спутниковых океанологических систем *GFO*, «*Jason-2*», следует считать, что отечественная спутниковая система для обеспечения оперативной океанологической информацией морской деятельности должна включать группировку КА на полярных изомаршрутных орбитах с кратностью не более 10 суток. Спутники должны быть оснащены радиовысотомерами для измерения высоты морской поверхности в полосе шириной не менее 120 км с пространственным разрешением не хуже 2 км и точностью измерения не хуже 1 - 2 см. Данные измерений со спутников через геостационарные ретрансляционные спутники должны передаваться на наземные приемные пункты для последующей специализированной обработки.

ТМП связана с процессом взаимодействия «атмосфера-океан» и поэтому – является ключевым параметром для оперативной океанологии. Ассимиляция данных измерения ТМП в океанские динамические модели обеспечивает возможность корректировать ошибки при анализе и прогнозе областей теплового потока, ветра. Она также характеризует мезомасштабную изменчивость верхнего слоя океана (вихри, фрон-

⁴ Средняя высота самой крупной трети волн.

тальные структуры) с очень высоким пространственным разрешением (несколько километров). Данные измерений ТМП позволяют с высоким разрешением анализировать области течений, выявлять области апвеллинга.

треоования к альтиметрии для оперативной океанологии							
Задачи,		Требуемая точность, пространственное Диапазон измерений разрешение, периодичность период обновления и простра ственный охват				гь, ю іность, ростран-	
ооъекты исследова- ния	Протя- жен- ность, км	Динами- ческий цикл	Ско- рость, м/с	Высота, м/км	По высоте Δh , по направл. θ , по скорости ΔV	Простран- ственное разр., км	Период обнов- лен, (про- стран. охват)
1	2	3	4	5	6	7	8
 Контроль морских течений: 							
экваториаль- ные течения	5000	месяцы – годы	0,01	(0,1 – 0,3)/ 100	$\Delta h = 2 - 3 \text{ cm}$ $\theta = 10^{\circ}$ $\Delta V = \bullet$	100 – 300 км	1 – 2 раза/ месяц (глоба- льно)
крупномас- штабные круговороты	3000	от одного до нескольк. лет	0,01	0,5/1000	$\Delta h = 5 - 10$ c_{M} $\theta = 10^{\circ}$ $\Delta V = \bullet$	100	2 – 3 раза/ месяц (глоба- льно)
западные пограничные течения	100	от дней до нескольк. лет	1	0,5/100	$\Delta h = 15 - 20$ CM $\Theta = 10^{\circ}$ $\Delta V = \bullet$	10	5 – 6 суток (локально)
восточные пограничные течения	100	от дней до нескольк. лет	0,1	0,3/100	$\Delta h = 3-5 \text{ cm}$ $\theta = 10^{\circ}$ $\Delta V = \bullet$	10	5—6 суток (локаль- но)
ринги	100	от недель до нескольк. лет	0,5-2	1/100	$\Delta h = 10 - 15$ CM $\Theta = 10^{\circ}$ $\Delta V = \bullet$	10	10 – 15 суток
2. Контроль океанских вихрей	100 – 500	от недель до нескольк. лет	≤ 0,1	0,25/•	$\Delta h = 2 - 3 \text{ cm}$ $\theta = 10 - 15^{\circ}$	2-3	5 – 6 суток (локально)
3. Определе- ние высоты волн	•	•		1—15	$\Delta h = 10 - 20$ cm	•	2 раза/ сутки

Требования к альтиметрии для оперативной океанологии

Таблица 2

Продолжение таблицы 2

4. Контроль океанских приливов	500 - 1000	12 час	0,1	1	$\Delta h = 5 - 10 \text{ cm}$	100	2 раза/ сутки
5. Внутрен- ние волны	0,1 - 100	часы и менее	0,1	0,01	$\Delta h = 1 \text{ cm}$	10-20 м	ежесуточ- но (ло- кально)
6. Штормо- вые нагоны	≤100	часы – сутки	1	1/•	$\Delta h = 10 \text{ cm}$	10 – 20 км	ежесуточ- но (ло- кально)
7. Контроль ледового покрова	сотни метров – десят- ки км	до нескольк. суток	_	до нескольк. м	$\Delta h = 20 \text{ cm}$	0,1-3 км	2 – 3 суток
8. Определе- ние поля приводного ветра	•	от неск. часов до недель	2-50	по высоте волн от 0,1 до 15 м	$\Delta h = 3 - 5 \text{cm}$ $\theta = 10^{\circ}$ $\Delta V = 2 \text{ m/c}$	50 км	1 раз в сутки
9. Исследо- вания при- брежного	20-300 км	_	_	0,2/100	$\Delta h = 3 - 4 \text{ cm}$	2 – 5 км	5 – 7 суток

Примечание: значок • обозначает отсутствие данных.

Требования оперативной океанологии к спутниковой океанологической системе для измерения ТМП представлены в таб. 3 [2].

Проблема измерения значения ТМП, отвечающего ключевым требованиям оперативной океанологии, заключается в том, что ни один из видов используемых для этой цели спутниковых дистанционных датчиков не обеспечивает получение её адекватных значений. Чтобы установить истинное значение ТМП, необходимо использовать данные измерений, одновременно полученные всеми датчиками, перечисленными в табл. 3.

Из рассмотренных проблем измерения ТМП следует, что разрабатываемая океанологическая система для измерения ТМП в интересах оперативной океанологии должна быть оснащена радиометрами перечисленных в табл. 3 типов. Особый акцент должен быть сделан на разработку радиометра класса *B* для калибровки измерений ТМП другими типами радиометров. Прототипом прибора такого типа является радиометр *AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer –* Усовершенствованный вдольтрассовый сканирующий радиометр), установленный на КА Европейского космического агентства (*ESA*) *Envisat*. Это многоканальный отображающий радиометр с высоким уровнем точности за счет применения способа измерения излучения по двум направлениям одновременно. Достигаемая точность измерения ТМП составляет 0,2 К независимого от факторов, типа стратосферных аэрозолей от вулканических извержений или тропосферной пыли, которые вызывает существенные погрешности в других инфракрасных датчиках. Измеряемые радиометром значения ТМП используется для калибровки радиометров других типов. Для океанологической спутниковой системы также должен быть разработан микроволновый радиометр класса C, аналогом которого является AMSR-E (Усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр), устанавливавшийся на спутнике EOS. Прибор имеет двенадцать каналов на шести частотах для измерения яркостной температуры на частотах 6,925; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5 и 89 ГГц. Во всех каналах производятся измерения в вертикальной и горизонтальной плоскостях поляризации. Калибровка осуществляется по измерениям космической фоновой радиации и бортового эталона. Пространственное разрешение измерений изменяется от 5,4 км на частоте 89 ГГц до 56 км на частоте 6,9 ГГц.

Таблица 3

Класс системы	Тип системы	Спектральный диапазон каналов радиометра	Пространственное разрешение, километр	Ширина полосы захвата	Ширина полосы захвата
1	2	3	4	5	6
А	Два спутника на полярных орбитах с инфракрасным радиометром	Три канала на длинах волн: 3, 7; 11; 12 мкм; 1 канал в ближнем ИК-диапазоне; 1 канал в видимом диапазоне	1	2500 км	Дневное и ночное по- крытие каж- дым спутни- ком
В	Один спутник на полярной орбите с радиометром для измерения по двум угловым направлени- ям. Точность измере- ния ТМП – 0,1 К. Используется как эталон для других типов радиометров	Три канала на длинах волн: 3, 7; 11; 12 мкм; 1 канал в ближнем ИК-диапазоне; 1 канал в видимом диапазоне по каждому направ- лению	1	500 км	Глобальное покрытие каждые 4 дня
С	Один спутник на полярной орбите с микроволновым радиометром, опти- мизированным для измерения ТМП. Покрытие с низким пространственным разрешением райо- нов, экранированных облачностью	2 канала на частотах: – 7 ГГц; – 11 ГГц	50 (размер пиксела 25 км)	1500 км	Глобальное покрытие каждые 2 дня
D	Инфракрасный ра- диометр на геостаци- онарной платформе	Три канала на длинах волн: 3, 7; 11; 12 мкм; 1 канал в ближнем ИК-диапазоне; 1 канал в видимом диапазоне	2-4	Полуша- рие Земли	Интервал отчета через каждые 30 мин

Требования оперативной океанологии к спутниковой океанологической системе для измерения температуры морской поверхности

Точное знание положения ледовой кромки зоны и местоположений пакового льда и разводий существенно для того, чтобы обеспечивать морскую деятельность в Арктике. Для оперативного обеспечения органов управления и пользователей информацией о ледовых условиях в этой зоне необходимо организовать спутниковый мониторинг ледового покрытия. Эти задачи могут быть осуществлены развертыванием специализированной океанологической спутниковой системы, КА которой оснащены интерферометрическими радиолокаторами бокового обзора, обеспечивающими измерения высоты ледовой поверхности над уровнем моря в полосе захвата свыше 120 км с дискретностью отсчета высот с площадок размером 2×2 км. Получаемые системой данные позволят решить задачу оперативного определения толщины льда.

Для определения положения разводий и скорости дрейфа льда КА специализированной океанологической спутниковой системы необходимо оснастить радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА), работающем в микроволновом диапазоне частот 1 - 15 ГГц (длины волн соответственно в диапазоне от 30 до 2 см). РСА обеспечивает получение информации независимо от наличия облачности и условий освещенности. Используемый принцип синтеза апертуры позволяет достичь требуемого для обнаружения разводий уровня пространственной разрешающей способности 3 - 5 м.

С помощью РСА данного типа может быть получены данные о дрейфе ледовых полей, основанные сравнении их радиолокационных изображений, зарегистрированных на последовательных спутниковых проходах над заданным районом. Информация о ледовом покрытии арктических морей, полученная по данным от РСА должна также ассимилироваться в ледовых диагностических и прогностических ледовых моделях для обеспечения морской деятельности.

Проблема информационного обеспечения данными о толщине льда должна решаться также путем создания специализированной океанологической системы, включающей космические аппараты, аналогичные аппаратам Crvosat-2 ESA [6]. Основной инструмент зонда – интерферометрический радиолокационный высотомер с синтезированной апертурой типа радиолокационного высотомера SIRAL (SAR/Interferometric Radar Altimeter) [7], устанавливавшегося на КА Cryosat-2, который работал в трех режимах: режим низкого разрешения – для обычных альтиметрических измерений сравнительно плоских континентальных ледяных полей на суше и на море; режим интерферометрии с синтезированной апертурой (Synthetic Aperture Radar Mode) – для высокоточных измерений дрейфующих морских льдов; интерферометрический радиолокационный режим – для изучения сложных, пересеченных рельефов, которые могут, к примеру, встречаться в активных зонах, где ледяные поля стыкуются с континентальным шельфом. Радиолокатор-высотометр SIRAL, работая в режиме интерферометрии с синтезированной апертурой, будет обнаруживать расщелины во льду и использовать их в качестве реперных точек для измерений дрейфующих морских льдов. Интерферометрический метод заключается в измерении угла, образуемого направлением отраженного сигнала с базой интерферометра по разности фаз сигнала, приходящего на две разнесенные антенны. Ориентация базы интерферометра в геодезической координатной системе определяется с помощью трехосного звездного астроориентатора, три оптических датчика которого будут делать до пяти снимков в секунду. Изображения будут сравниваться с формируемыми из каталога изображениями участков звездного неба встроенным компьютером.

Толщина льда оценивается путем осреднения всех данных, полученных в квадратах сетки 100 на 100 км в течение месяца. Технические характеристики интерферометрического радиолокатора для оснащения спутниковой океанологической системы (класса *SIRAL*) представлены в табл. 4.

Новые возможности для оперативного получения данных о свойствах морской среды будет представлять реализация в океанологической спутниковой системе метода дистанционного измерения солености морской воды по данным измерения яркостной температуры морской поверхности на частоте 1,4 ГГц, которая зависит от диэлектрической проницаемости морской воды и, таким образом, солености поверхностного слоя океана.

Таблица 4

№ пп.	Характеристика	Значение	
1	Тип прибора	Интерференционный радиолокатор с син- тезируемой апертурой	
2	Назначение	Измеряет толщину льда, топографию морской поверхности, скорость приводного ветра	
3	Режимы работы	 режим низкого разрешения – для обычных альтиметрических измерений; режим интерферометрии с синтезированной апертурой; интерферометрический радиолокационный режим 	
4	Частотный диапазон	13,575 ГГц	
5	База интерферометра	1,172 м	
6	Разрешающая способность по высоте	1,3 см	
7	Дискретность отсчетов высоты	0,46875 м	

Технические характеристики интерферометрического радиолокатора для оснащения спутниковой океанологической системы

С этой целью на спутнике должен быть установлен радиометр, измеряющий яркостную температуру в L диапазоне (1,4 ГГц) [2]. Аналогом прибора такого типа является радиометр, устанавливавшийся на спутнике *SMOS ESA* в 2009 г. Прибор производил измерения яркостной температуры морской поверхности под различными углами к надиру (0 – 60°). Для повышения пространственного разрешения в радиометре данного типа используется метод синтеза апертуры антенны. Радиометр обеспечивает измерение солености верхнего слоя океана с точностью 1 единица практической шкалы солености с пространственным разрешением 40 км. При усреднении измерений точность измерения солености составила 0,1 – 0,2 единиц солености [2].

Главным применением в оперативном океанологическом обеспечении морской деятельности информации об оптических характеристиках морской воды, получае-

мых спутниковыми методами, будет являться оценка эффективности подводных наблюдательных систем и оптических систем обнаружения подводных объектов, а также расчет глубин по измеренной оптической яркости акватории. При этом информация должна представляться в виде значений прозрачности по белому диску и в виде значений коэффициента диффузного ослабления света для различных длин волн света. Значение коэффициента диффузного ослабления света особенно важно для съемки рельефа дна прибрежных акваторий дистанционными методами. Получение этих параметров основано на измерении с помощью спутниковых радиометров яркости акватории в нескольких спектральных диапазонах.

Для получения данных об оптических свойствах воды спутниковый радиометр должен иметь оптические каналы в спектральном диапазоне 0,4 – 0,9 мкм, и, в частности, на следующих длинах волн: 0,443; 0,49; 0,51; 0,56; 0,62; 0,665 мкм и другие. Требуемая точность измерения яркости акватории для решения задач океанологического обеспечения морской деятельности должна быть на уровне менее 1%. Требуемая пространственная разрешающая способность – 0,1 – 0,5 км. Периодичность измерений – одни сутки.

Таким образом, создаваемая спутниковая океанологическая система для получения данных о состоянии и свойствах морской среды в интересах океанологического обеспечения морской деятельности должна включать группировку космических аппаратов на различных орбитах, оснащенных измерительной аппаратурой и осуществляющих непрерывный мониторинг Мирового океана. Система должна включать наземный комплекс приемных пунктов и центров специализированной обработки данных спутниковых измерений для формирования соответствующей оперативной информационной продукции и предоставления ее органам управления и пользователям.

Выводы

Эффективное информационное обеспечение морской деятельности может быть осуществлено на основе специализированной спутниковой океанологической системы. Спутниковая океанологическая система должна быть создана с учетом специфических требований к составу, точности и пространственной разрешающей способности аппаратуры для измерения параметров состояния морской среды. Зарубежный и отечественный опыт создания и использования технических средств дистанционного зондирования Мирового океана подтверждают возможность их реализации в отечественной океанологической системе. Рост интенсивности морской деятельности в интересах экономики и обороноспособности государства повышают актуальность создания такой системы, включая наземную составляющую приема, обработки и предоставления океанологической информации пользователям.

Литература

1. What is Operational Oceanography? Электрон. дан. – Режим доступа: URL: http://eurogoos.eu/about-eurogoos/what-is-operational-oceanography. – (Дата обращения: 22.06.2017).

2. Satellites and Operational Oceanography. Электрон. дан. – Режим доступа: URL: http://www.google.ru. – (Дата обращения: 22.06.2017).

3. М. I. Pujol, F. Briol, G. Dibarboure, P. Y. Le Traon Using high resolution altimetry to observe mesoscale and sub-mesoscale signals//Journal of atmospheric and oceanic technology. – 2012. – V. 29. – N. 9. – Р. 1409 – 1416. Электрон. дан. – Режим доступа: URL: http://archimer.ifremer.fr/doc/00101/21192. – (Дата обращения: 22.06.2017).

4. R. Keith Raney, David L. Porter WITTEX: An Innovative Multi-Satellite Radar Altimeter Constellation. A Summary Statement for the High-resolution Ocean Topography Science Working Group. Электрон. дан. – Режим доступа: URL: http://www.google.ru. – (Дата обращения: 22.06.2017).

5. Aqua Earth-observing satellite mission / Aqua Project Scienceurl. Электрон. дан. – Режим доступа: URL: http://aqua.nasa.gov/about/instrument_amsr.php. – (Дата обращения: 22.06.2017).

6. Cryosat mission overview. Электрон. дан. – Режим доступа: URL: http://www.esa. int. – (Дата обращения: 22.06.2017).

7. Cryosat's instruments. Электрон. дан. – Режим доступа: URL: http://www.esa.int / Our Activities/Observing the Earth/CryoSat/Instruments. – (Дата обращения: 22.06.2017).

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

М. М. Матюшин, Ю. С. Луценко (ФГУП ЦНИИмаш)

Аннотация. Статья посвящена анализу влияния основных свойств (факторов влияния) современных систем управления космическими группировками на показатели эффективности их функционирования (стоимость иелевой информации, оперативность ее получения, глобальность управления, загрузка средств управления, использования возможностей аппаратуры и т. п.). В целях максимального использования потенциала этих систем при их создании и модернизации необходимо основываться на системном подходе, исходя из предназначения системы (наблюдение за поверхностью Земли, периодичность наблюдения и т. д.). Анализ влияния каждого фактора на результаты функционирования системы позволяет получить не только качественные, но и ряд количественных результатов и выводов об эффективности этой системы, а также определить направления проведения исследований, соответствующие организационные мероприятия и технические решения. В настоящей статье приведены обобщенные результаты применения описанного подхода к исследованию современных принципов построения систем управления низковысотными космическими аппаратами и анализу факторов влияния, начиная от рекомендаций по структуре системы и заканчивая предложениями по внедрению технических решений, реализуемых в ближайшие годы. Приведенные рекомендации позволяют практически полностью реализовать потенциал системы.

Ключевые слова: система управления космической группировкой, факторы влияния, средства управления, структура системы, эффективность системы.

Острая конкуренция на рынках космических услуг, высокая стоимость создания и эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ) предполагает проведение масштабных системных исследований по развитию систем управления такими сложными объектами как космические аппараты (КА) и группировки КА.

Совершенствование этих систем идет по пути внедрения новых технических и организационных решений (модернизация структуры и технологий функционирования системы). Следует отметить, что организационные решения часто позволяют достичь большего эффекта, чем технические.

Проблема минимизация стоимости получаемой от КА целевой информации является важнейшей при обосновании направлений развития системы управления и ракетно-космической техники в целом. Анализ программ развития российской космонавтики [1] свидетельствует о планируемом значительным увеличении количества автоматических КА, создании орбитальных группировок низковысотных КА (НКА) на околополярных орбитах, улучшении характеристик целевой аппаратуры, совершенствовании существующих средств управления [2, 3] при сохранении традиционных подходов к управлению КА. Орбитальные группировки включают КА, выполняющие похожие задачи и имеющие близкие характеристик траекторий полета, например ОГНКА дистанционного зондирования Земли, гидрометеорологические, научного назначения и др.

Вопросы управления КА [4 – 6] не претерпели существенных изменений за последние десятилетия. Наиболее существенные результаты достигнуты в разработке и внедрении методологии построения ОГ [7, 8]. Результатом является создание наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) и реализация линейных и ветвящихся технологий управления. Методология создания НАКУ предполагает достаточно слабую взаимосвязь процессов разработки его подсистем. Например, создание наземного и космического контуров управления [9], командно-измерительных станций и станций приема целевой информации во многом осуществлялось независимо. Это существенно снижает эффективность использования КА и НАКУ, приводит к потере конкурентоспособности нашей космонавтики. В частности, можно отметить следующее:

- реальная загрузка НАКУ гораздо меньше потенциальной;

 не разработаны методология и технологии взаимодействия наземного и космического контуров управления;

 не создана методология управления космическими группировками как единым объектом;

 потенциальные возможности перспективной целевой аппаратуры КА могут быть нереализованы средствами НАКУ [10].

Альтернативные взгляды на построение систем, комплексов и технологий управления КА, учитывающие системное влияние технических, структурных и технологических характеристик на результаты управления, не нашли достаточно широкого отражения в публикациях. Неучет этого факта на ранних этапах создания РКТ, приводит к потере показателей эффективности функционирования системы $\Omega_{KA(K\Gamma)}$ – стоимость целевой информации, оперативность ее получения, которые зависят от пространственно-временных характеристик траекторий полета КА, средств управления, технологий управления и технических решений [10, 11], так как для сложных систем *extr* $\Omega_{KA(K\Gamma)} \Omega(\cap extr\Omega_i \forall i)$. Так, например, группировка из 19 НКА обеспечивает загрузку средств НАКУ не более чем на 20 – 27 %, при наличии десятков конфликтных и нереализуемых ситуаций, дальнейший рост группировки без увеличения количества средств НАКУ практически недопустим [6].

Современные требования к оперативности и глобальности управления, оперативности получения целевой информации в условиях ограничения ресурсов могут быть выполнены только в случае системного рассмотрения проблемы повышения эффективности ОГКА.

В настоящее время в России функционирует несколько десятков НКА. Структурно системы управления (СУ) этими космическими аппаратами и группировками КА незначительно отличаются друг от друга, так же как и технологии управления. Для примера рассмотрим систему управления КА [10] научного и социальноэкономического назначения (КА НСЭН).

Органы управления: оператор КА и центр управления полетами (ЦУП) в составе центра ситуационного анализа, координации и планирования средств НАКУ (ЦСАКП), центра управления ретрансляцией и связью (ЦУРС), центров управления полетом КА (ЦУП КА), и лица (органа), принимающего решение (ЛПР). Средства управления: наземные средства приема-передачи командно-программной, телеметрической, измерительной информации (НСУ) и космические средства (КСУ) – приемо-передающие, а также средства приема целевой информации (СПЦИ).

Решаемые задачи иерархически организованы (см. рис. 1), но не объединены в единый программно-аппаратный комплекс. Управление ОГКА в настоящее время производится аналогично управлению одиночными КА [5, 10], т. е.:

$$U_{\rm or} = U(\Phi) = \Sigma \ U_{\rm kai},\tag{1}$$

$$U_{\text{ka}i} = U_{\text{ka}}(t, S_{\text{IIBC}i}, U_{\text{IIA}i}), \tag{2}$$

где $U_{\kappa ai}$ – вектор управления функционированием *i*-го КА; $U_{\iota ai}$ – вектор управления целевой аппаратурой *i*-го КА; $S_{\Pi BCi}$ – пространственно-временная структура траектории *i*-го КА.

На рис. 2 указаны основные факторы, определяющие функционирование системы управления КА.



Рис. 1. Обобщенная структура системы управления космическим аппаратом



Рис. 2. Факторы, определяющие эффективность системы управления

Таблица 1

Состояние и направления совершенствования системы управления КА НСЭН на ближайшую перспективу

Факторы	Характеристика СУ КА НСЭН	Основные недостатки	Направления исследований и работ
Струк- тура СУ	Система управления космическими аппара- тами трехконтурная.	 Большое количество органов управления. Длительный срок подготовки и утверждения данных на управление. Невозможность оперативной корректировки управления КА. При нескольких операторах КА подготовка управления существенно усложнятся. 	 Разработка методологии построения двухконтурной систе- мы управления. Разработка методо- логии адаптивного планирования НКА. Разработка методо- логии управления ОГ как единым объектом управления.
Техно- логии управ- ления	Линейные и ветвящиеся технологии.	 Невозможно оперативно изменить задачи КА в тече- ние цикла управления. Невозможно управлять ОГ как единым объектом. 	 Разработка техноло- гий управления ОГ. Разработка методо- логии и технологии ситуационного, адап- тивного управления.

			Продолжение таблицы І
ПВС объекта управ- ления	Разработаны оптималь- ные ПВС для орбиталь- ных группировок на круговых и эллиптиче- ских орбитах.	 Много конфликтных си- туаций при планировании средств НАКУ. Малое время наблюдаемости КА. Отсутствуют решения по построению ПВС космиче- ских группировок. 	Разработка методоло- гии и математического обеспечения построе- ния оптимальных (ра- циональных) ПВС космических группи- ровок.
ПВС средст в управ- ления	 – НАКУ КА НСЭН создана исходя из ПВС объектов пилотируемой космонавтики. – ПВС МКСР «Луч» обеспечивает глобальную управляемость НКА в диапазоне высот 200 – 2200 км. 	 Максимально достижимая загрузка средств НАКУ не может превысить 30 – 40 %. ПВС НАКУ не учитывает структуру перспективной группировки КА. 	 Размещение средств НАКУ исходя из ПВС перспективных ОГКА. Проведение косми- ческого эксперимента по управлению НКА средствами МКСР «Луч».
Уро- вень авто- мати- зации управ- ления (разви- тия ПО)	Процесс подготовки данных для управления КА включает много «ручных» операций.	 Длительный срок подго- товки данных для управле- ния КА. Большой состав персонала управления КА. Высокая вероятность вне- сения ошибок. 	 Автоматизация под- готовки управления КА и средствами управления. Разработка методо- логии удаленного управления КА. Разработка ПО вир- туализации управле- ния. Разработка моделей автоматического кон- троля данных управ- ления.
Техни- ческие харак- тери- стики средств управ- ления	 Применяется два разных типа средств НКУ. Технические характеристики НКУ на мировом уровне. Технические характеристики космических средств управления существенно хуже зарубежных аналогов. 	 Длительный срок подготовки средств управления к сеансу связи. Каждое средство НКУ одновременно может проводить сеанс связи только с одним КА. Управление НКУ производится в автоматизированном режиме персоналом средств управления. 	 Исследование возможности внедрения антенных комплексов других типов. Унификация средств НКУ. Разработка методо- логии совместного планирования средств НКУ и ККУ. Разработка техноло- гии управления сред- ствами НКУ из ЦУП.
Харак- тери- стика КА как объекта управ- ления	 Отставание бортовой аппаратуры приема- передачи информации, вычислительных средств и устройств памяти от зарубежных аналогов. Отсутствие на борту КА аппаратуры глобаль- ных систем навигации. 	 Управление НКА может осуществляться только средствами НКУ, за исклю- чением КА «Канопус-В». Прогноз траекторий поле- та КА возможен только на основании проведения сеан- сов внешнетраекторных измерений. 	 Установка на борт НКА аппаратуры единой ко- мандно-телеметрической системы и ретрансляции. Установка на борт НКА аппаратуры системы навигации глобальных навигационных систем.

Продолжение таблицы					
	 Отсутствие на борту КА аппаратуры обмена информацией с МКСР «Луч». 				
Состав средств управ- ления	Позволяет обеспечить проведение необходи- мого количества сеансов связи для всех КА НСЭН во всех режимах функционирования.	 С ростом количества НКА до двадцати резко возрастает количество конфликтных ситуаций. СПЦИ и НАКУ не позво- лят обеспечить полноцен- ное управление перспектив- ной группировкой КА. 	Оценка необходимо- сти установки, количе- ства и мест дислока- ции новых средств управления.		
Состав объек- тов управ- ления	В настоящее время группировка КА НСЭН, управляемая из ЦУП ЦНИИмаш, включает 8 КА. Планируется груп- пировка до двадцати.	Отставание численности и возможностей планируемой группировки КА от главных конкурентов возрастает.	Исследование воз- можности создания и технологий управле- ния группировками КА, включающими десятки и сотни одно- типных КА.		
Внеш- ние факто- ры	 Наличие большого количества неуправляе- мых и управляемых объектов в околоземном пространстве. Возможны сбои ПО управления КА и сред- ствами управления. 	 Учет работы АСПОС осуществляется в «ручном» режиме. «Нештатные» ситуации анализируются и устраня- ются в течение длительного времени после отработки их разработчиками РКТ. 	 Разработка техноло- гий управления КА с учетом результатов работы АСПОС. Разработка в ЦУП КА ПО «медленного» контура управления анализа нештатных ситуаций. 		

В силу изменчивости, тесной взаимосвязи и взаимовлияния перечисленных факторов необходимо проводить их совместный анализ, оценку, прогноз на основе методологии исследования больших систем и на каждом шаге рассматривать решения, улучшающие (не ухудшающие) характеристики системы (обобщенные и частные).

В качестве обобщенной характеристики системы целесообразно рассматривать себестоимость получаемой информации, а в качестве частных – загрузку средств управления, оперативность управления, глобальность управления, количество конфликтных ситуаций и т. п. Обобщенные результаты исследований (качественные и количественные), выводы из полученных результатов, направления работ, улучшающие показатели функционирования системы, представлены в табл. 1.

Более детальные результаты по системе управления группировками КА можно получить на основе исследования следующих моделей: структурная, динамическая, информационная, модель технологии и т. д. Полученные авторами [10, 11] и другими исследователями [3, 7] результаты позволяют заключить, что в случае реализации в течение ближайшего десятилетия перечисленных в табл. 1 мероприятий будет достигнуто:

 – сокращение времени расчета управления группировкой КА НСЭН до нескольких часов;

обеспечение коррекции задач НКА за время одного витка полета;

повышение эффективности применения ОГКА за счет управления ими как единым объектом и оперативного перераспределения задач КА;

 – снижение количества конфликтных ситуаций при планировании средств НАКУ, и повышение времени их целевого задействования;

- достижение 100 %-й наблюдаемости и управляемости НКА;

- повышение надежности управления КА;

 обеспечение возможности увеличения числа управляемых КА минимум в дватри раза;

повышение качества целевой информации;

- уменьшение стоимости управления и целевой информации.

В итоге пирамида управления группировками КА будет перевернута. Основу центров управления будут составлять исследователи и разработчики методов, технологий и программного обеспечения, что позволит реализовать ряд прорывных научных технологий и весь потенциал РКТ. В случае создания космических группировок, включающих сотни микро- и нано-А результаты проведенных исследований послужат основой создания новых концепций управления, внедрения необходимых технических средств и перехода к адаптивным, роевым и мультиагентным технологиям управления.

Выводы

В статье с системных позиций рассмотрено состояние современной системы управления группировками НКА. Сформулированы факторы, определяющие качество функционирования этой системы. Изложены направления ее совершенствования и получаемые в результате их реализации результаты. Так, переход на двухконтурную систему управления резко сократит расходы на управление и повысит ее оперативность; переход на перспективные средства управления, позволит увеличить как минимум в два раза располагаемое время связи с КА. Привлечение МКСР «Луч» к управлению НКА позволит обеспечить глобальную управляемость КА, сокращение времени расчета управления группировкой КА, увеличение количества управляемых КА из одного ЦУП до нескольких десятков, повышение надежности управления.

Литература

1. Красильников А. Российская гражданская орбитальная группировка. Новости космонавтики. – 2014. – № 3 (374). – Т. 24. – С. 47 – 49.

2. Максимов А. М., Райкунов Г. Г., Шучев В. Г. Научно-технические проблемы развития наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Космонавтика и ракетостроение. – 2011. – № 4 (65). – С. 5 – 12.

3. Бажанов Б. Л., Бачманов М. М., Исков Д. А., Твердохлебова Е. М., Хартов В. В. Пути и перспективы устранения ограничений на эффективность использования высокоинформативных космических средств ДЗЗ со стороны передачи полученных данных на Землю // Материалы четвертой международной конференции актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли. – 2016. – С. 186 – 192.

4. Малышев В.А. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление. – М.: МАИ, 2000. – 568 с.

5. Жигастова О. К., Почукаев В. Н. Программный комплекс автоматизированного планирования полёта автоматических космических аппаратов. – М.: Вестник МАИ. – Т. 21. – № 4. – С. 60 – 70.

6. Литвиненко А. О. Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления. – М.: Труды МАИ. – Выпуск 86. www.mai.ru/science/trudy/.

7. Лукашевич Е. Л. Космический комплекс «Канопус-В» и решение задач картографии». — Тезисы докладов четвертой международной научно-технической конференции Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли. – М.: ВНИИЭМ, 2016. – С. 8 – 11.

8. Можаев Г. В., Синтез орбитальных структур спутниковых систем: (Теоретико-групповой подход). – М.: Машиностроение, 1989.

9. Ногов О. А. Планирование сеансов при управлении ретрансляцией и связью с использованием МКСР «Луч». – М.: Труды МАИ. – Выпуск 66. www.mai.ru/ science/trudy/.

10. Матюшин М. М., Луценко Ю. С., Гершман К. Э. Синтез структуры органа управления космическими группировками: Журнал. – М.: Труды МАИ». – Вып. 89. www.mai.ru/science/trudy/.

11. Матюшин М. М., Луценко Ю. С. Вопросы оптимизации пространственновременной структуры космической группировки. – Материалы четвертой международной научно-технической конференции Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли. – М.: ВНИИЭМ 2016. – С. 16–21.

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОЙ НЕИСПРАВНОСТИ

А. С. Ананьин, А. Б. Уманский, Г. Е. Яцук

(АО «НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова»)

Аннотация. В статье рассматривается проблема выполнения требования работы вычислительной системы при одной возможной неисправности (OBH). Проводится обзор классических систем с трехканальной мажоритированной выборкой, показаны недостатки такой архитектуры в условиях применения современной элементной базы. Показаны этапы перехода от структур с глубокой мажоритацией к системам с контролем резерва на программном уровне в двух канальном исполнении. Приведено обоснование того, что двухканальные системы при необходимом уровне программно-логического контроля обеспечивают выполнение требования OBH, сохраняя при этом необходимый уровень производительности и надежности.

Ключевые слова: вычислительная система, мажоритар, программно-логический контроль, одна возможная неисправность.

Традиционно в ракетно-космической технике (РКТ) требование функционирования в условиях любой одной возможной неисправности (ОВН) классически решалось троированием с применением мажоритара. При этом в основном требование функционирования в условиях ОВН предъявлялось к системе управления (СУ). Изначально данное требование функционирования являлось попыткой увеличить надежность радиоаппаратуры, которая на заре ракетно-космической отрасли была крайне не надежной. Требование к другим узлам ракетно-космической техники не применялось по причине их больших габаритов. Со временем надежность радиоаппаратуры значительно увеличилась, на смену электронным лампам пришли транзисторы, а затем интегральные схемы, что позволило значительно снизить массу аппарата, уменьшить потребляемую мощность и увеличить время наработки на отказ.

Таким образом, СУ перестала быть самым ненадёжным элементом изделия РКТ, но требование функционирования в условиях ОВН исторически сохранилось. При этом проблемой применения классической мажоритарной выборки стало то, что аппаратный мажоритар приводит к существенной потере производительности современных процессоров.

Ранее классическая мажоритарная выборка применялась по всем внутренним срезам вычислительной машины. Классическая структура подразумевала магистральномодульный принцип построения вычислительной машины. Так в состав машины входил модуль, управляющий обменами в машине, ведущий циклограмму режимов и осуществляющий контроль вычислительного процесса с восстановление в случае сбоев, модулями связи, производящими обмены с внешними, по отношению к машине, абонентами и вычислительный модуль, собственно производящий основные вычисления по алгоритмам управления.

Все выходы каждого процессора, находящиеся в составе каждого модуля вычислительной машины, мажоритировались. Так процессор соединялся с оперативной и неперезаписываемой памятью через мажоритар, весь информационный обмен внутри вычислительной машины, через магистраль, также происходил через мажоритар (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема трехканальной ВС с мажоритированием памяти

Собственно мажоритирование происходило в момент обращения процессора к каким либо внешним для процессора абонентам, например памяти. Для того чтобы мажоритар сработал, необходимо чтобы это обращение от всех процессоров происходило максимально одновременно, с наименьшим разбросом.

С увеличением частоты функционирования узлов вычислительной машины, время обращения процессоров к мажоритару должно уменьшится, по факту этого не происходит, так как даже, тактируясь с одного генератора опорной частоты, современные процессоры не могут работать такт в такт. Причиной являются встроенные в процессоры делители/умножители частоты, конвейеры включая механизмы предугадывания, а также механизмы по обнаружению и устранению ошибок. Таким образом количество тактов процессора при обращении процессоров к мажоритару увеличилось, по сравнению с предыдущими вычислительными машинами, т. е. мажоритар стал проблемным местом современной вычислительной машины.

Наибольшая частота внешней шины процессора – частота шины памяти. Для увеличением частоты работы процессора пожертвовали мажоритаром на шине работы с памятью, при этом сравнение трех процессоров стало происходить только при обращении к магистрали (рис. 2).



Рис. 2. Структурная схема трехканальной ВС без мажоритированной памяти

Использование мажоритара только при обращении к магистрали ухудшает время обнаружения неисправности, что в свою очередь приводит к невозможности понять, в какой момент произошло искажение. Невозможность понять, в какой момент произошло искажение, приводит к необходимости восстанавливать всю оперативную память сбившегося модуля, что затратно по времени.

Дальнейшее развитие частоты работы процессора привело к серьезным потерям производительности при использовании мажоритара даже при общении с магистралью. Решением проблемы стало исключение данного мажоритара для обеспечения сокращении частоты использования мажоритарной выборки. Поскольку время мажоритарной выборки перестало быть привязано к какому-либо физическому процессу, то логичным стало использование мажоритированной выборки на программном уровне (рис. 3).

Попытки реализации мажоритированной выборки на программном уровне выявило ограничения, заключающиеся в том, что контроль информации осуществляется не постоянно, а только в определённых контрольных точках, например, при использовании результатов расчёта, в которых эта исходная информация применилась. Однако к моменту использования результатов расчёта данные уже могут быть искажены, поэтому в условиях сбоев может быть выбран неправильный результат расчета, что может привести к неправильной работе СУ. Увеличение частоты контрольных точек значительно уменьшает производительность системы управления.

Одним из вариантов решения данной задачи стало использование двухканальной вычислительной системы (BC) (рис. 4).


Рис. 3. Структурная схема трехканальной ВС с программным мажоритированием

Однако в двухканальной системе должна быть решена задача контроля правильности функционирования. Она может быть решена с помощью программнологического контроля (ПЛК). При этом решать задачу достоверности и задачу контроля правильности функционирования нельзя между каналами двухканальной ВС, так как один неисправный модуль одного канала может ложно забраковать исправный модуль другого канала, что приведет к нарушению требования функционирования в условиях ОВН. Поэтому требования определения правильного функционирования должно быть решено в рамках своего канала.

Зависший канал не может произвести самоперезагрузку, поэтому задача ПЛК не решается полностью без поддержки дополнительных аппаратных средств модуля. Одним из путей решения является использование сторожевого таймера внутри модуля. Если в вычислительном модуле физически не может быть встроенного сторожевого таймера, необходимо использовать внешний сторожевой таймер – модуль таймеров (в этом случае он бывает более интеллектуальным). Например, вычислительный модуль может вести циклическую выдачу счётчика контрольного времени (СКВ).

Программно-логический контроль, в зависимости от требований достоверности и характера решаемой задачи в двухканальной системе может представлять из себя:

1) контроль плавности;

2) двойной просчет;

3) контроль последовательности операций и контроль переходов.

Контроль плавности. В случае если рассчитываемая величина — физическая, имеет определенные характеристики, а так же известна максимальная скорость ее изменения то рационально использовать контроль плавности вычислений, т. е. Контролировать изменение величины на попадание в определенные, заранее известные ворота.



Рис. 4. Структура двухканальной ВС с модулем таймеров

Выход за эти ворота будет означать ошибку в вычислениях и соответственно непрохождение программно-логического контроля. Очевидно, что эти ворота не должны быть слишком широкими, для того чтобы можно было обнаружить ошибку, а так же не должны быть слишком узкими, для того чтобы случайно не забраковать канал. Данный метод имеет только один недостаток – необходимость заранее, при разработке алгоритмов определить какие величины могут быть проконтролированы и определить закон их изменения, что само по себе является трудоемкой задачей.

Двойной просчёт. Для особо критичных вычислений, в которых не может быть применён контроль плавности, может быть применен двойной просчет с последующим сравнением результатов. Несравнение результатов двух просчетов будет означать ошибку в вычислениях и соответственно непрохождение программнологического контроля. Данный метод при своей простоте имеет ряд недостатков. Во первых повышенное использование вычислительных ресурсов, поэтому его применяют только для особо ответственных вычислений. Во-вторых, он может определить не все возможные неисправности, а только сбои, например неисправность в процессоре, вызывающая ошибочную, но повторяющуюся ошибку даст одинаковый, но ошибочный результат.

Контроль последовательности задач, контроль переходов. При построении алгоритмов очень часто оказывается, что определенные задачи выполняются в некоторой последовательности, и некоторые задачи не могут выполнятся, без успешного выполнения предыдущих задач. В таком случае используется контроль последовательности задач, при выполнении задач устанавливается флаг о успешности её выполнения. При выполнении последующих задач, зависящих от предыдущих проверяется набор необходимых флагов, сигнализирующих о выполнении требуемых задач. В условиях, когда решаемая задача является циклической, все флаги на момент начала цикла должны быть сброшены в 0. Также возможна ситуация, что даже при циклической работе к определенному моменту должен быть сформировано некоторое условие, тогда это условие по началу цикла не сбрасывается и продолжает контролироватся. Данный метод достаточно прост в реализации, практически не накладывает ограничения на построение алгоритмов, а также определение последовательности задач не является трудоемкой задачей.

При прохождении всех программно-логических контролей, вычислительным модулем должен быть выставлен флаг разрешения расчёта СКВ, и дальнейшая его выдача в модуль таймеров. Пропуск СКВ или неправильная выдача означает, что вычислительный модуль либо завис, либо совершил сход с выполнения программы.

С учетом того, что зачастую ВС должна работать в рамках единой шкалы времени, а между каналами системы существует задача синхронизации времени, целесообразно вынести эту задачу из вычислительного модуля для повышения производительности системы и независимого решения этой задачи. Для этого также можно использовать модуль таймеров, который обеспечивает необходимую точность, плавную подтяжку к внешней шкале времени и раздачи времени в информационной системе.

Таким образом, применение двухканальной ВС с модулем таймеров позволяет решить задачу контроля правильности функционирования и обеспечить выполнение требования ОВН. Одновременно с этим данное решение позволяет уменьшить нагрузку вычислительного модуля на задачи ПЛК, снять с вычислительного модуля задачу синхронизации времени между каналами и обеспечить подтяжку собственного времени к внешней шкале времени, что, в целом, повышает производительность двухканальной ВС.

Литература

1. Антимиров В. М. Архитектура вычислительных комплексов для бортовых систем управления нового поколения / В. М. Антимиров, В. Н. Ачкасов, П. Р. Машевич // Системы управления и информационные технологии. – 2005. – № 5(20). – С. 41–45.

2. Антимиров В. М. Исследование вариантов резервирования магистральных связей в вычислительной системе / В. М. Антимиров, В. Н. Ачкасов, П. Р. Машевич // Информационные технологии моделирования и управления: сб. науч. тр. / ГТУ. – Воронеж. – 2005. – Вып. 18. – С. 12–17.

3. Антимиров В. М. Современные вычислительные комплексы для бортовых систем управления / В. М. Антимиров, В. Н. Ачкасов, П. Р. Машевич // Полет. – 2005. – № 8. С. 65 – 71.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОТРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Г. Е. Яцук, А. Б. Уманский, А. С. Ананьин

(АО «НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова»)

Аннотация. В статье приведена методика оценки надежности программного обеспечения (ПО) системы управления космическим аппаратом, основывающаяся на представлении структуры программы в виде вершин графа. Отмечается, что для оценки надежности необходимо провести анализ ПО с выделением основных путей исполнения ПО и присвоением им весовых коэффициентов, определяющих первоочередность отработки того или иного пути. Приведен пример оценки надежности программы прошивки ПЗУ вычислителя, обещается последовательность действий для применения на практике и делается вывод о преимуществах полученной модели с точки зрения практического применения.

Ключевые слова: надежность ПО, метрики, сложность ПО, графовая модель.

Традиционно оценка показателей надежности программного обеспечения (ПО) и их прогнозирование производится на базе математических моделей надежности программ.

Надежность программы является характеристикой ее исполняемого кода. Отработка программы проводится для подтверждения выполнения требований технического задания на разработку системы управления (СУ). В процессе разработки ПО на начальных этапах ставится задача обеспечения функционирования по «положительной ветке», т. е. должно быть достигнуто прохождение всех режимов и задач при условии отсутствия неисправностей в приборах СУ. Как правило, прохождение по «положительным веткам» является самым простым этапом. Наиболее сложным и емким процессом отработки является проверка функционирования по «отрицательным веткам», с внесением неисправностей или имитацией нештатных ситуаций.

Если представить алгоритм, в соответствии с которым разработано и функционирует ПО, в виде управляющего графа G(V,E), то при функционировании по «положительной ветке» осуществляется прохождение ПО по одному и тому же пути L, т. е. вероятность бессбойного исполнения P(L) = 1. С учетом того, что для СУ КА существует множество режимов (предстартовая подготовка, полет, зачетные или сдаточные режимы, режимы с имитацией полета), то для *n*-режимов при функционировании в штатных режимах при отсутствии неисправностей путем отработки подтверждается, что:

$$i=1 \div n, \forall i : P(L_i) \cdot 1,$$

где *L_i* – путь, пройденный по управляющему графу при функционировании ПО в *i*-м режиме работы, *n* – количество режимов.

Соответственно, при исполнении ПО по каждому пути L_i осуществляется прохождение через множество V_i вершин управляющего графа G. При этом множество вершин V_i для путей прохождения L_i пересекается, в этом случае можно выделить максимально достижимый подграф $G_0(V_0, E)$, причем такой, что:

$$G_0(V_0, E) \in G(V_i, E), V_0 \in V_i$$

Иными словами, даже в процессе функционирования по различным штатным режимам производится отработка или подтверждение безотказности работы общей вершины, представленной подграфом $G_0(V_0, E)$.

Для этапов отработки ЛОИк и СОИк при функционировании по положительным веткам обеспечивается полное покрытие условий и решений путей *L_i*, каждый из которых соответствует тому или иному режиму функционирования. Покрытие условий и решений зависит от возможностей комплексов для отработки СУ.

В режиме предстартовой подготовки СУ функционирует в проверочных режимах, поэтому вероятность выполнения предстартовой подготовки с учетом последовательного и независимого исполнения i = 1...n задач может быть определена как:

$$P_{nn} = \prod_{i} P(L_i),$$

где i – соответствующий номер проверочной задачи, $P(L_i)$ – вероятность исполнения i-задачи.

Для режима основной полетной программы вероятность исполнения равна:

$$P_{\text{onn}} = P(L_{\text{onn}}),$$

т. е. исполнения пути L_{опп} основного направленного управляющего графа.

При отработке на комплексных стендах (КС) необходимо применение штатной аппаратуры, в качестве исполнительных элементов и датчиков могут применяться их эквивалентные имитаторы. В силу штатного исполнения аппаратуры возможности позиции КС в части полноты покрытия могут быть ограничены возможностями применяемой имитирующей аппаратуры, которая подключается к штатным приборам, и математических моделей. Важным свойством комплексной отработки является то, что отработка ведется по принципу «черного ящика».

Отработка происходит последовательно, с постепенным увеличением количества отработанных путей исполнения ПО. В процессе отработки устанавливаются более приоритетные направления, определяемые в порядке очередности исходя из следующих принципов:

- первоначально отрабатываются положительные ветки прохождения ПО;

 – отработка основных отрицательных веток, спровоцированных возникновением наиболее вероятных неисправностей постоянного характера в аппаратуре СУ, имитацию которых наиболее просто произвести в техническом плане;

 отработка основных отрицательных веток, спровоцированных возникновением менее вероятных неисправностей аппаратуры СУ, которые носят сложный характер (кратковременный сбой, возникновение более одной неисправности) и имитацию которых технически сложно выполнить.

Таким образом, на конкретном этапе отработки вероятность безотказного исполнения ПО равна вероятности безотказного исполнения множества путей L^m (*m*-весовой коэффициент), причем L^m входит в состав множества L:

$$L_i^m \in L^m, L^{m-1} \in L^m, L^m \in L$$
,

причем общее количество путей равно метрике Маккейба М. Все предыдущие пути входящие в состав подмножества с коэффициентом m входят в состав подмножества с коэффициентом (m + 1). Весовой коэффициент m в этом случае должен быть целочисленным. Он определяет первоочередность отработки, и чем он ниже, тем более приоритетным является этап отработки.

Таким образом, на начальных этапах отработки вероятность безотказного исполнения программы равна $P = P(L^1)$, т. е. множеству путей L_i^1 . Для более поздних этапов отработки и в процессе эксплуатации СУ эта вероятность равна $P = P(L^m)$.

По итогам отработки программа считается правильной, если она не содержит ошибок. При этом можно описать среднее значение вероятности безотказного исполнения:

$$\overline{\mathbf{P}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P(L_i)}{n} \ .$$

Формула дает возможность оценить качество ПО по результатам отработки.

В качестве практического применения графовой модели, ниже приведен пример оценки надежности для ПО прошивки flash памяти вычислителя бортовой ЦВС.

На рис. 1 приведен вид алгоритма для задачи записи информации в flash-память вычислителя. Вид управляющего графа для данной задачи приведен на рис. 2. Данная задача используется при функционировании СУ КА гражданского назначения и предназначена для обновления ПЗУ вычислителя.

Для приведенного на рис. 2 управляющего графа метрика Маккейба равна 11, т.е. граф имеет 11 путей исполнения. Положительным исполнением задачи являются пути с входящими в них вершинами:

 $\begin{array}{l} L_1:1-2-3-4-5-7-8-9-10-11-12-15-16-18-19-20-21-7-13-23-24-25;\\ L_2:1-2-3-4-5-7-8-9-10-11-12-15-16-18-19-20-21-7-8-9-10-11-13-14-1-2-3-6-22-24-25. \end{array}$

Вероятность исполнения пути по положительной ветке будет равна произведению вероятностей бессбойной работы (ВБР) вершин V_i . Для вершины 1 и 25 по умолчанию P = 1, так как они не являются значимыми.

Для пути *L*₁ вероятность исполнения определяется следующим образом:

$$P(L_1) = \prod_i P(V_i), \quad i = 1 \div 12, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 7, 13, 23, 24, 25.$$

Отработка ПО проводилась в течении 9 этапов. На каждом этапе проводилась доработка ПО вершин, расчет проводился по результатам исполнения ПО на целевой аппаратуре бортовой ЦВС. График значения P(L) в зависимости от этапа отработки приведен на рис. 3.

Таким образом, для обеспечения возможности практического применения оценки надежности ПО необходимо:

1) подготовить первоначальных данных на основе результатов анализа структуры и содержимого ПО, а также исходных данных с учетом того, что:

 первоначальные данные должны содержать требования к объему тестирования и отражать структурную сложность ПО на основе метрики Маккейба, а также ее компонент (количество вершин графа);

 первоначальные данные должны содержать требования к вектору Т с учетом структурной сложности ПО и применительно к каждой из вершин управляющего графа;



Рис. 1. Алгоритм задачи записи информации во flash-памяти вычислителя



Рис. 2. Управляющий граф задачи записи информации во flash-памяти вычислителя



 провести тестирование ПО с использованием подготовленных первоначальных данных;

3) вести регистрацию всех результатов тестирования;

4) на основе данных тестирования выполнить расчеты.

Необходимо отметить, что выполнение такого большого объема работ целесообразно проводить с использованием средств автоматизации с целью снижения вероятности внесения случайных ошибок в процессе подготовки тестирования. По результатам эксплуатации СУ КА необходимо проводить учет выявленных ошибок. Практической ценностью предлагаемой модели является возможно оценки параметра ВБР ПО без необходимости проведения испытаний в полном объеме. Поскольку ошибки могут возникать при исполнении вершин V_i , соответственно при обнаружении ошибки и ее устранении отработке подлежит только та часть ПО, которой соответствует вершина V_i . Соответственно по мере устранения ошибок ВБР ПО будет расти и стремится к 1.

Литература

1. Яремчук С. А. Метод оценки количества программных дефектов с использованием метрик сложности // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2012. – № 5 (57).

2. Черников Б. В. Поклонов Б. Е. Оценка качества программного обеспечения. – М.: ИД «Форум» Инфра-М, 2012.

3. Ларионцева Е. А. Использование метрических характеристик программ при проведении сертификационных испытаний. Наука и образование. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.

4. Пальчун Б. П. Юсупов Р. М. Оценка надежности программного обеспечения. – СПб.: Наука, 1994.

5. Маевский Д. А. Яремчук С. А. Метод вероятностной оценки количества дефектов в программных модулях // Сборник Одесского политехнического университета. – 2013. – Вып. 1(40).

6. Липаев В. В. Тестирование компонентов и комплексов программ. – М.: Синтег, 2010.

7. Липаев В. В. Проектирование и производство сложных программных продуктов. – М.: Синтег, 2011.

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ СИСТЕМНОГО ВЗАИМНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО СОГЛАСОВАНИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКАМИ КА ДЗЗ И СОКРАЩЕНИЕ ИХ ВРЕМЕННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

И. В. Ашарина, А. В. Лобанов (АО «НИИ «Субмикрон»)

Аннотация. Рассматривается ключевая проблема построения сбое- и отказоустойчивых систем управления группировками КА ДЗЗ – обеспечение согласованной работы всех КА в условиях возникновения допустимых сочетаний произвольных («враждебных») неисправностей элементов группировки. Такая согласованность достигается посредством применения алгоритмов системного взаимного информационного согласования (СВИС), гарантирующих формирование во всех исправных КА одинаковых согласованных данных, в которых согласованные данные исправного КА совпадают с его согласуемыми данными. Рассматриваются подходы к снижению временной избыточности строящегося алгоритма СВИС.

Ключевые слова: отказоустойчивые, сетецентрические, распределенные, однокомплексные и многокомплексные многомашинные системы, статическая и динамическая избыточность, обнаружение и идентификация проявлений неисправностей, реконфигурация и восстановление системы, репликация задачи, синхронизация системы, системное взаимное информационное согласование.

Введение

Орбитальная группировка автоматических космических аппаратов (КА) и ее наземные средства поддержки (наземная инфраструктура) с точки зрения применяемых управляющих вычислительных средств представляет собой иерархическую, распределенную, сетецентрическую, многомашинную вычислительную систему (РМВС) [1], элементами которой являются РМВС отдельных КА и вычислительных систем наземной инфраструктуры, взаимодействующие между собой по межспутниковым каналам связи и каналам связи с наземной инфраструктурой. В свою очередь, каждый такой элемент также может представлять собой РМВС.

Особенностями рассматриваемых сетецентрических РМВС являются: а) автономность ЦВМ, б) отсутствие общей памяти, в) межмашинное взаимодействие по двухточечным и шинным каналам связи; г) многоуровневость системы и отсутствие централизованного управляющего органа; д) необходимость самосинхронизации и самоорганизации системы для обеспечения расширяемости, масштабирования системы, защиты от внешних неблагоприятных воздействий, проявлений допустимых неисправностей и ошибок проектирования; е) работа в режиме реального времени; ж) большой срок активного существования и возможность его продления за счет реконфигурации системы и введения в процессе работы такой РМВС дополнительных элементов и подсистем; з) высокие требования по живучести и надежности работы, а также по достоверности результатов.

По существующей классификации сетей системы рассматриваемого класса относятся к однора́нговым, децентрализо́ванным или пи́ринговым сетям— это оверлейные компьютерные сети, основанные на равноправии участников. В таких сетях отсутствуют выделенные серверы, и каждый узел может выполнять как функции клиента, так и функции сервера.

В отличие от архитектуры «клиент-сервер», такая организация позволяет обеспечивать длительный срок активного существования и продолжительную траекторию управляемой деградации.

«Философской» сущностью рассматриваемых систем с точки зрения сбое- и отказоустойчивости являются: 1) высокая сложность; 2) необходимость согласованной работы их элементов; 3) практическая невозможность точных выводов о техническом состоянии системы; 4) необходимость самостоятельного формирования этих выводов на основе принимаемых заранее и, возможно, неточных критериев; 5) необходимость уточнения этих критериев со стороны самой системы в процессе ее целевой работы, возможность к самообучению и самоадаптации таких систем к условиям применения и их изменениям; 6) необходимость принимать и выполнять самостоятельные решения о реконфигурации и управляемой деградации системы.

Проектирование таких систем необходимо проводить «сверху-вниз» на основе четких определений, понятий и моделей, с использованием теоретически обоснованных методов и алгоритмов.

Построение таких автоматических, замкнутых (необслуживаемых) РМВС ответственного и критического применения является одним из наиболее актуальных направлений современного развития средств вычислительной техники. Такая система рассматривается пользователями как единая объединенная система, исполняющая их комплексные целевые задания в виде сложного взаимодействия некоторой части или всех составляющих систему ЦВМ в едином временном поле и едином информационном пространстве. Эта система должна быть расширяемой, масштабируемой и реконфигурируемой, способной поддерживать, восстанавливать и адаптировать к новым условиям свою структуру и поведение, и должна обеспечивать правильное исполнение целевых заданий в условиях возникновения допустимых совокупностей неисправностей и их допустимых последовательностей, а также предусмотренных внешних неблагоприятных воздействий.

Анализ мировых тенденций развития показывает, что общими тенденциями развития космической техники являются [2]:

 – планомерный переход от тяжелых космических платформ к платформам среднего и малого класса;

 построение кластерных орбитальных группировок из сверхмалых КА с взаимным дополнением функциональных возможностей;

 – формирование многоспутниковых группировок, обеспечивающих высокую периодичность наблюдения требуемых регионов.

Построение кластерных орбитальных группировок из сверхмалых КА и формирование многоспутниковых группировок требуют создания общей методологии проектирования рассматриваемых PMBC и универсальной, обеспечивающей ее технологической среды разработки, отладки и испытаний.

В соответствии с существующим в космической отрасли РФ традиционным подходом к проектированию сложных сбое- и отказоустойчивых управляющих систем, при разработке архитектурной части проекта не учитывается требование обеспечения сбое- и отказоустойчивости. Это требование возникает только на этапе определения технических заданий (ТЗ) на аппаратурные и программные части и обычно формулируется в виде необходимости правильного продолжения целевой работы при отказе одного электро-радио изделия (ЭРИ). Разработчики аппаратурных и программных средств, исходя из такого требования, вводят в разработанные архитектурные решения известные им автономные механизмы обеспечения сбое- и отказоустойчивости, которые при последующем анализе такого введения могут потребовать коррекцию архитектуры проектируемой системы. Такие итерации повторяются до тех пор, пока не будет найдено удовлетворительное, по мнению разработчиков, решение. Однако такой процесс проектирования из-за высокой сложности систем может приводить к появлению в них негативных эффектов эмерджентности, состоящих в появлении ошибочного поведения из-за возникновения непредусмотренных системных явлений, неадекватности реалиям используемых моделей, ограничений, теорий, методов и алгоритмов. Такие эффекты, при их возникновении, чрезвычайно трудно поддаются анализу и обычно необоснованно «списываются» на еще не исследованные или не отработанные элементы технологии или защиты от внешних воздействий (например, недостаточную радиационную стойкость ЭРИ). Поэтому весьма важно на начальных, архитектурных этапах проектирования ставить и решать архитектурные проблемы обеспечения живучести и сбое- и отказоустойчивости, применять адекватные модели, ограничения, предположения, теории, методы и алгоритмы.

Проблемы создания рассматриваемых РМВС состоят в организации совместных действий большого количества разнородных ЦВМ, объединенных в гетерогенную сеть.

Факторами сложности при проектировании сбое- и отказоустойчивых систем рассматриваемого класса являются: а) неприемлемость традиционных моделей неисправностей ЦВМ; б) необходимость распределенного, синхронизированного и согласованного принятия решения; в) необходимость организации и управления динамической избыточностью системы (самореконфигурация и самоуправляемая деградация системы с переходом в безопасный останов при исчерпании ресурсов) при возникновении неисправностей или манипулировании соотношением «производительность – достоверность» для различных параллельно решаемых взаимодействующих целевых задач.

Из всех используемых в настоящее время моделей неисправностей ЦВМ [3] наиболее общей является модель враждебной (byzantine, rigorous, malicious) неисправности, при которой поведение неисправного процессора или ЦВМ допускается полностью произвольным, в том числе и подобным «злонамеренному», включая его неодинаковость по отношению к другим элементам системы. Эта модель покрывает все остальные модели, и методы организации сбое- и отказоустойчивых вычислений в условиях возникновения враждебных неисправностей будут обеспечивать защиту и от неисправностей всех других моделей. Модель враждебной неисправности отражает сложность нахождения причинно-следственной связи между видами проявлений неисправностей и имеющимися в действительности неисправностями таких сложных объектов как современная ЦВМ или РМВС.

Использование модели враждебной неисправности определяет необходимость применения структурной графовой модели системы, в которой вершины отображают ЦВМ и другие сетевые элементы РМВС, а ребра и дуги – каналы связи между ними.

Отказоустойчивость РМВС может достигаться двумя способами: обеспечением аппаратурной отказоустойчивости входящих в нее ЦВМ (репликация аппаратуры) или решением копий одной и той же задачи на нескольких ЦВМ с последующим обменом результатами и выбором из них правильного (репликация задачи, программно-управляемая сбое- и отказоустойчивость РМВС). Недостаток первого способа заключается в том, что при увеличении числа ЦВМ в системе должен расти уровень избыточности, вводимой в каждую ЦВМ, для сохранения постоянного уровня надежности РМВС.

В настоящей работе рассматриваются PMBC, в которых применяется второй способ достижения сбое- и отказоустойчивости, основанный на двух следующих видах избыточности: 1) статическая избыточность обеспечивает только правильность результата вычислений за счет избыточного количества его копий в предположении, что только меньшая их часть является ошибочными (маскирование проявлений неисправностей): 2) динамическая избыточность обеспечивает: а) парирование проявлений допустимых враждебных неисправностей за счет параллельного выполнения одной и той же задачи на нескольких ЦВМ с обменом полученными результатами и выбором из них правильного, б) обнаружение и идентификацию по месту возникновения и типу (сбой, программный сбой, отказ) возникающих неисправностей, в) восстановление целевой работы и исправления ошибочной информации после сбоев и программных сбоев, г) реконфигурацию системы (с использованием запасных элементов) и восстановление целевой работы после отказов, д) управляемую деградацию системы с возможным допустимым снижением характеристик вплоть до предельно заданной возможной конфигурации, е) безопасный останов системы при невозможности построения такой конфигурации, ж) возможность перераспределения ресурсов системы для изменения соотношения производительность-достоверность между различными решаемыми задачами. Именно этот подход рассматривается в данной работе.

Сложность организации в системе перечисленных действий состоит в том, что в процессе выполняемой системой целевой работы, независимо от ее текущего состояния, возникающих неисправностей и их проявлений, необходим синхронизированный и согласованный переход всей системы к синхронизированным и согласованным, но различающимся действиям всех ее элементов. При этом должны осуществляться не просто субъективные обнаружение и идентификация проявлений неисправностей, выполняемые внутри отдельных элементов (результаты которых также могут быть ошибочными), а объективные системные обнаружение и идентификация, при которых все исправные элементы системы принимают синхронизированные и согласованные решения, не противоречащие реальному техническому состоянию системы и определяющие дальнейший ход вычислительного процесса во всех этих элементах.

Согласованность индивидуальных действий различных исправных ЦВМ в системе основывается на наличии взаимно-однозначных номеров этих ЦВМ и одинаковости анализируемых ими для этого исходных данных, в которых согласованные данные, относящиеся к исправной ЦВМ, совпадают с ее согласуемыми данными. Такая одинаковость исходных данных в условиях возникновения допустимых совокупностей враждебных неисправностей гарантируется только использованием алгоритмов взаимного информационного согласования (ВИС) [4, 5] Алгоритмы ВИС оцениваются величинами требуемых аппаратурной, временной и информационной избыточности [5].

1. Метод построения алгоритма СВИС для многокомплексной системы

Группа ЦВМ, решающих копии одной и той же целевой задачи (при одинаковых исходных данных) с целью маскирования допустимых проявлений неисправностей, называется комплексом [6, 7]. В настоящей работе под комплексом понимается структура, обеспечивающая как парирование проявлений допустимых совокупностей неисправностей, так и возможность выполнения всех действий, предусматриваемых введением динамической избыточности, среди которых одним из основных является возможность осуществления ВИС при заданном уровне сбое- и отказоустойчивости этой структуры. В многокомплексной системе имеются несколько пронумерованных комплексов, которые параллельно решают разные целевые задачи, обменивающиеся между собой информацией по средам обмена между ними. Организация вычислений

в таких системах с использованием динамической избыточности при заданных индивидуальных уровнях сбое- и отказоустойчивости каждого комплекса и каждой среды межкомплексного обмена также требует выполнения в такой системе процессов системного ВИС (СВИС), обеспечивающего при любой допустимой совокупности враждебных неисправностей формирование в каждой исправной ЦВМ системы одинакового вектора согласованных значений всех ЦВМ системы, в котором согласованное значение исправной ЦВМ совпадает с ее согласуемым значением.

В [8, 9] определяются достаточные структурные условия достижения СВИС в многокомплексных системах, а также предлагается алгебраический метод выделения в графовой модели исходной системы, имеющей произвольную структуру (вершины отображают ЦВМ, дуги – симплексные двухточечные каналы межмашинной связи), заданных непересекающихся комплексов и сред межкомплексных обменов для требуемых уровней сбое- и отказоустойчивости, индивидуальных как для каждого комплекса, так и для каждой среды межкомплексного обмена. Метод гарантирует выделение заданных непересекающихся комплексов и сред межкомплексного обмена, если это возможно.

Можно полагать, что алгоритм СВИС будет одним из наиболее часто исполняемых общесистемных действий в рассматриваемых системах и в значительной степени будет определять их пропускную способность, существенное значение в которой будет иметь временная избыточность применяемого алгоритма СВИС, т. е. длительность выполнения этого алгоритма всей системой.

Ниже используются термины, определения и обозначения из [8, 9].

Пусть строится многокомплексная система, структура (орграф H) которой сформирована посредством метода из [8, 9] и, значит, удовлетворяет достаточным условиям достижения СВИС. В этой структуре к каждой вершине каждого орграфа комплекса-получателя ϕ_j (*j*=1,2) приписан требуемый для нее орподграф $L_{\phi_i \to p_j}$

 $(i, j = 1, 2, i \neq j)$ посылки копий вектора согласованных значений комплекса-источника из определенного подмножества его вершин в данную вершину p_j орграфаполучателя. Гарантируется, что при посылке копий вектора согласованных значений из комплекса-источника ϕ_i по путям приписанного орподграфа $L_{\phi, \rightarrow p_j}$ любая допу-

стимая совокупность неисправностей в комплексе-источнике ϕ_i , приписанном орподграфе посылки $L_{\phi_i \to p_j}$ и комплексе-приемнике ϕ_j , может привести к ошибкам только

в меньшей части полученных в p_j копий вектора согласованных значений комплексаисточника ϕ_i . Это позволяет данной вершине p_j комплекса-приемника для вычисления правильного значения вектора согласованных значений комплекса-источника применить функцию мажорирования, аргументами которой будут все получаемые ею копии вектора согласованных значений комплекса-источника.

Предлагаемый метод построения алгоритма СВИС для сформированной структуры многокомплексной системы состоит в следующем.

1. Для каждого комплекса посредством метода из [10] или [11] строится алгоритм внутрикомплексного ВИС, выполнение которого обеспечивает формирование вектора согласованных значений этого комплекса (ВСЗК) в каждой его ЦВМ.

2. Из алгоритмов, построенных на шаге 1, строится распределенный алгоритм параллельного выполнения внутрикомплексных ВИС во всех комплексах искомой системы с формированием в каждой ЦВМ каждого комплекса ВСЗК этого комплекса.

3. Для каждой *i*-й ЦВМ каждого *j*-го комплекса-получателя строится алгоритм посылки из каждого *k*-го комплекса-источника копий его ВСЗК по приписанному этой ЦВМ графу посылки *L_{i,j,k}*, учитывающий необходимость вычисления значений ВСЗК в промежуточных вершинах в соответствии с результатами ранжирования вершин [9].

4. Для каждого комплекса-получателя из алгоритмов, построенных на шаге 3, строится распределенный алгоритм параллельной посылки копий ВСЗК каждого комплекса-источника в каждую ЦВМ этого комплекса-получателя.

5. Для каждой ЦВМ каждого комплекса-получателя строится алгоритм вычисления достоверного значения ВСЗК каждого комплекса-источника на основе полученных копий его ВСЗК.

6. Строится распределенный алгоритм параллельного вычисления достоверного значения ВСЗК каждого комплекса-источника во всех вершинах всех комплексовполучателей.

7. Для каждой вершины каждого комплекса строится алгоритм формирования вектора согласованных значений искомой системы (ВСЗИС) из достоверных значений ВСЗК всех комплексов системы.

8. Строится распределенный алгоритм параллельного формирования ВСЗИС во всех вершинах всех комплексов-получателей.

9. Распределенный алгоритм СВИС состоит в последовательном выполнении распределенных параллельных алгоритмов, построенных на шагах 2, 4, 6, 8.

2. Пример построения алгоритма СВИС для двухкомплексной РМВС

Пусть методом из [9] сформирована структура двухкомплексной PMBC: комплекс 1 имеет основные вершины 1, 2, 3, 4, неосновные вершины 9, 10, 11; комплекс 2 имеет основные вершины 5, 6, 7, 8, неосновные вершины 13, 14; вершины среды межкомплексной посылки – 15, 16, 17 (рис. 1).

Под временной избыточностью алгоритма СВИС (или какого-либо из его этапов) понимается время в квантах, необходимое для выполнения алгоритма СВИС (или какого-либо из его этапов). Как и в [10], предполагается, что обмен информацией между ЦВМ в процессе СВИС осуществляется при помощи передачи сообщений. Межмашинная передача между смежными ЦВМ-передатчиком и ЦВМ-приемником по каналу связи между ними и последующая необходимая обработка полученных сообщений выполняется в течение одного кванта, имеющего собственный порядковый номер в последовательности квантов. Начало кванта во всех ЦВМ системы является одновременным.

На 1-м шаге предлагаемого метода построения алгоритма СВИС для каждого комплекса посредством метода из [10] строится алгоритм внутрикомплексного ВИС, выполнение которого обеспечивает формирование вектора согласованных значений этого комплекса (ВСЗК) в каждой его ЦВМ. Этот алгоритм содержит три этапа. На первом этапе осуществляется построение выражений в формате ДНФ, описывающих пучки путей, по которым посылаются согласуемые значения неосновных ЦВМ в основные. Например, для 1-го комплекса для посылки из неосновной вершины 9 в основные вершины 1, 3, 4 строится ДНФ возможных пучков путей такой посылки сообщений, из которой выберем терм $9 \cdot 10 \cdot 11 \cdot 1 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 4$, определяющий искомые пути посылки. Длительность этой посылки составляет 3 кванта. Анализ термов всех пучков путей посылки согласуемых значений всех неосновных вершин в основные вершины позволяет определить длительность для всех таких посылок во всех комплексах, которая составляет не менее чем 3 кванта.

На втором этапе строятся ДНФ возможных пучков путей посылки сообщений из каждой основной вершины каждого комплекса во все остальные основные вершины этого комплекса. Из такой ДНФ для 1-го комплекса выбираем, например, терм $1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 11 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 4$, определяющий пути посылки из основной вершины 1 во все

остальные основные вершины этого комплекса. Длительность прохождения сообщения по этому пучку составляет 4 кванта – это максимальная длительность этого этапа для обоих комплексов. Но второй этап предполагает два раунда обменов сообщениями, поэтому длительность этого этапа составляет 8 квантов.



Рис. 1. Фрагмент сети, в которой необходимо выделить двухкомплексную МВС

На третьем этапе пучок из основных вершин в неосновную вершину 9 определяется, например, термом $2 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 4 \cdot 9$ и имеет длительность 2 кванта. Максимальная длительность этого этапа составляет 3 кванта для пути посылки сообщения из 4 основной вершины в 10 неосновную вершину комплекса 1.

На шаге 2 предлагаемого метода построения алгоритма СВИС из алгоритмов, построенных на шаге 1, строится распределенный алгоритм параллельного выполнения внутрикомплексных ВИС во всех комплексах искомой системы с формированием ВСЗК этого комплекса в каждой ЦВМ каждого комплекса.

Сумма максимальных длительностей в первом комплексе составляет 14 квантов, во втором комплексе – 10 квантов и длительность алгоритма параллельного выполнения внутрикомплексных ВИС шага 2 составляет 14 квантов.

На 3-м шаге метода для каждой *i*-й ЦВМ каждого *j*-го комплекса-получателя строится алгоритм посылки из каждого *k*-го комплекса-источника копий его ВСЗК по

приписанному этой ЦВМ графу посылки $L_{i,j,k}$, учитывающий необходимость вычисления значений ВСЗК в промежуточных вершинах в соответствии с результатами ранжирования вершин [9].

Этот алгоритм строится на основе ДНФ возможных пучков путей посылки сообщений из вершин каждого комплекса-источника в вершины комплексаполучателя в соответствии с орграфами посылки, приписанными вершинам комплекса-источника и сформированными в процессе выделения сред межкомплексного взаимодействия [9] и включает в себя формирование ВСЗИС в о всех вершинах комплекса-получателя. Наиболее длинный путь описываемый термом $5 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 17 \cdot 13 \cdot 16 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 15 \cdot 1$ соответствует посылке ВСЗК второго комплекса в вершины первого комплекса и имеет длительность 2 кванта. Остальные пути, в том числе и пути передачи сообщений из комплекса 1 в комплекс 2 имеют длительность в 1 квант.

На шаге 4 предлагаемого метода для каждого комплекса-получателя из алгоритмов, построенных на шаге 3, строится распределенный алгоритм параллельной посылки копий ВСЗК каждого комплекса-источника в каждую ЦВМ этого комплексаполучателя, а на шагах 5 – 8 также строится распределенный параллельный алгоритм, обеспечивающий формирование ВСЗИС в каждой вершине каждого комплекса-получателя.

Шаг 4 метода предполагает использование пучков путей из комплекса-источника в комплекс-получатель, построенных с учетом ранжирования вершин комплекса-получателя [9]. Для данного примера приведем термы, описывающие такие пути из комплекса 2 в комплекс 1. Введем в качестве верхнего индекса при номере вершины комплекса-получателя ее ранг. Тогда терм, описывающий пучок входящих путей в вершину 1 нулевого ранга будет иметь вид $5 \cdot 1^0 \cdot 8 \cdot 1^0 \cdot 7 \cdot 17 \cdot 1^0 \cdot 13 \cdot 16 \cdot 1^0 \cdot 14 \cdot 15 \cdot 1^0$, а терм, описывающий пучок входящих путей в вершину 1 нулевого ранга будет иметь вид $5 \cdot 1^0 \cdot 8 \cdot 1^0 \cdot 7 \cdot 17 \cdot 1^0 \cdot 13 \cdot 16 \cdot 1^0 \cdot 14 \cdot 15 \cdot 1^0$, а терм, описывающий пучок входящих путей в вершину 11 первого ранга – $1^0 \cdot 11^1 \cdot 2^0 \cdot 11^1 \cdot 4^0 \cdot 9 \cdot 10 \cdot 11^1$ [9].

Таким образом, процесс согласования в построенной искомой системе требует 18 временных квантов.

Выделенная структура искомой системы (структуры комплексов и структура среды межкомплексного обмена) прямо влияет на величину временной избыточности алгоритма СВИС. Однако в методе из [9] предлагается выбор приемлемой структуры системы, найденной первой из всех возможных таких структур. Эта особенность определяет одно из возможных направлений поиска метода снижения временной избыточности алгоритма СВИС: выделение структуры системы среди возможных, определяемых методом из [8, 9], наиболее способствующей снижению временной избыточности.

Пусть для PMBC, которую необходимо построить, также можно выделить в исходной сети 1-й комплекс, имеющий основные вершины 2, 4, 5, 6, неосновные вершин отсутствуют, и 2-й комплекс, который имеет основные вершины 7, 8, 14, 15, неосновные вершины 1, 13, 17. В этой структуре среда межкомплексной посылки не имеет вершин и передача сообщений между комплексами происходит между смежными вершинами, принадлежащими разным комплексами и занимает 1 временной квант. Анализ выражений ДНФ для такой РМВС позволяет построить алгоритм СВИС длительностью 12 временных квантов. Этот пример показывает, что анализ различных вариантов структуры искомой РМВС может существенно уменьшить временную избыточность алгоритма СВИС.

Литература

1. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 960 с.: ил.

2. Стратегическая программа исследований технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» на 2016 – 2020 годы // https://tp.iss-reshetnev.ru/documents/documents-other/programm-2016 – 2020.pdf.

3. Barborak M., Dahbura A., Malek M. The consensus problem in fault-tolerant computing // ACM Computing Surveys (CSUR). – June 1993. – Vol. 25. – Issue 2. – P. 171 – 220.

4. Lamport L., Shostak R., Pease M. The byzantine generals problem // ACM Trans. Progr. Lang. and Syst. -1982. -V. 4. -N 3. -P. 382 - 401.

5. Генинсон Б. А., Панкова Л. А., Трахтенгерц Э. А. Отказоустойчивые методы обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах // АиТ. – 1989. – № 5. – С. 3 – 18.

6. Мамедли Э. М., Соболев Н. А. Механизмы операционных систем, обеспечивающие отказоустойчивость в управляющих многомашинных вычислительных системах // АиТ. – 1995. – № 8. – С. 3 – 63.

7. Мамедли Э. М., Самедов Р. Я., Соболев Н. А. Метод локализации «дружественных» и «враждебных» неисправностей // АиТ. – 1992. – №. 5. – С. 126 – 138.

8. Ашарина И. В., Лобанов А. В. Выделение комплексов, обеспечивающих достаточные структурные условия системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах // АиТ. – № 6. – 2014. – С. 115 – 131.

9. Ашарина И. В., Лобанов А. В. Выделение структурной среды системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах // АиТ. – № 8. – 2014. – С. 146 – 156.

10. Ашарина И. В., Лобанов А. В., Мищенко И. Г. Взаимное информационное согласование в неполносвязных многомашинных вычислительных системах // АиТ. 2003. – № 5. – С. 190 – 198.

11. Ашарина И. В., Лобанов А. В. Взаимное информационное согласование в неполносвязных гетерогенных многомашинных вычислительных системах // АиТ. – 2010. – № 5. – С. 133 – 146.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОТРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Г. Е. Яцук, А. Б. Уманский, А. С. Ананьин, Д. И. Зелизко (АО «НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова»)

Аннотация. В статье рассматривается проблема оценки эффективности отработочных позиций и предлагается методика оценки качества отработки ПО для разных типов позиций. В качестве базового критерия вводится коэффициент качества отработки, отмечается, что в общем случае достоверно рассчитать данный коэффициент невозможно без учета типа позиции, для которой ведется расчет. Предложена методика на основе анализа вершин графа путей исполнения ПО, позволяющая учесть специфику позиции, на которой отрабатывается то или иное множество путей исполнения ПО.

Ключевые слова: отработка ПО, эффективность, графовая модель.

Отработка ПО производится в несколько этапов и на разных позициях. Отработочные позиции могут иметь различные технические характеристики и возможности. Используя полученные результаты, возможно как провести оценку эффективности отработки для одной конкретной позиции, так и сравнить полученный результат для разных позиций.

Отработка проводится с использованием штатных приборов СУ, либо их эквивалентов с использованием технологической аппаратуры, которая позволяет:

 – контролировать исполнение программ как в среде разработки, так и на целевой аппаратуре в режиме реального времени;

- считывать содержимое регистров, ОЗУ и ПЗУ в процессе исполнения программы;

 контролировать взаимодействие БЦВС с внешними подсистемами по требуемым интерфейсам.

Отработка может проводится с использованием нескольких технических позиций, например:

 на рабочем месте программиста, позиция позволяет проводить отладку программы без учета взаимодействия с внешними подсистемами БЦВС, а при необходимости – без учета межмодульного взаимодействия внутри БЦВС;

 в составе комплекса отработки аппаратуры и программ, данная позиция позволяет проводить отработку с использованием взаимодействия БЦВС с внешними системами;

 в составе цифрового моделирующего комплекса, где проводится отработка алгоритмов функционирования БАСУ;

 в составе комплексного стенда, где производится отработка с использованием штатной аппаратуры.

Та или иная позиция обладает характерными преимуществами и недостатками. Например, внутреннюю логику функционирования ПО без учета внешнего взаимодействия можно полностью отработать только в составе рабочего места программиста. Отработку с учетом внесения неисправностей и кодового взаимодействия между системами наиболее эффективно можно выполнить в составе комплекса отработки аппаратуры и программ. На комплексном стенде возможно проведение отработки с учетом внесения наиболее вероятных и простых технических неисправностей в штатную аппаратуру. Поэтому на практике задача решается путем разделения задач, подлежащих отработке на той или иной позиции, а также задействования каждой позиции в необходимом объеме, что в итоге позволяет обеспечить высокое качество отработки.

Предлагаемая модель надежности ПО позволяет оценить качество отработки ПО для отработочной позиции – без учета специфики отработочной позиции можно определить тот объем ПО, который можно отработать исходя из технических возможностей по отношению к требуемому объему. Для этого введем $K_{\kappa o}$ – коэффициент качества отработки. В процессе функционирования в общем виде априорной оценке подлежит конечный результат, то очевидной оценкой является определение соотношения количества путей исполнения ПО которое возможно проверить на отработочной позиции к общему количеству:

$$K_{\rm \tiny KO} = \frac{m}{n},\tag{1}$$

где m – количество путей исполнения ПО, которое возможно проверить на отработочной позиции, n – общее количество исполнения путей ПО. Максимальное значение $K_{\kappa 0}$ не может превышать 1.

На практике на отработочных позициях невозможно целиком выполнить полностью тот или иной путь исполнения ПО. Например, на позиции рабочего места программиста невозможно отработать взаимодействие БЦВС с внешними системами. В этом случае расчет по формуле (1) затруднен.

Более точную оценку качества отработки можно получить, учитывая задействование вершин графа путей исполнения ПО. Для этого необходимо использовать соотношения количества вершин 1-го и 2-го рода, которые возможно проверить на отработочной позиции, к общему количеству вершин. При этом необходимо учесть, что:

 вершины 1-го рода имеют одно множество *Y*, связанное с передачей управления к последующим вершинам;

 вершины 2-го рода могут иметь несколько множеств Y так же связанных с передачей потока управления.

Для дальнейшего анализа следует использовать матрицу смежности. Введем α (коэффициент учета вершин 2-го рода) и β (коэффициент учета вершин 1-го рода).

Для вершин 2-го рода число выходящих рёбер из *i*-й вершины 2-го рода в любую *j*-ю вершину равно 1, что характеризует отсутствие вариантности по потоку управления графа. Коэффициент а учета вершин 2-го рода возможно вычислить следующим образом:

$$\alpha = \frac{m_{V^2}}{n_{V^2}},$$

где m_{v^2} – количество вершин 2-го рода, которое возможно проверить на данной отработочной позиции; n_{v^2} – количество вершин 2-го рода, которое необходимо проверить.

Для вершин 1-го рода число выходящих рёбер из *i*-й вершины 1-го рода в любую *j*-ю вершину равно сумме элементов a_{ii} матрицы смежности, что характеризует наличие вариантности по потоку управления графа. Коэффициент β учета вершин 2-го рода возможно вычислить следующим образом:

$$\beta = \frac{\sum_{i} \sum_{j} a_{ij}^{m}}{\sum_{i} \sum_{j} a_{ij}^{n}}.$$

В этом случае К_{ко} можно представить следующим образом:

$$K_{\rm KO} = \frac{m_{V^2} + \sum_i \sum_j a_{ij}^m}{n_{V^2} + \sum_i \sum_j a_{ij}^n} \cdot$$

Эмпирически возможно определить относительное значение $K_{\kappa o}$ для разных отработочных позиций.

Однако на практике происходит декомпозиция процесса отработки, которая предполагает, что на каждой позиции упор делается на отработку тех или иных элементов ПО. С учетом применения нескольких отработочных позиций и того, что на каждой отработочной позиции отрабатывается определенное множество путей исполнения ПО, $K_{\kappa 0}$ определяется следующим образом:

$$K_{\rm ko} = \sum_{i=1}^n K_{\rm ko}^i \quad ,$$

где i=1...n – количество отработочных позиций, $K_{\kappa_0}^i$ – коэффициент качества отработки для i-й позиции.

Таким образом, при организации процесса отработки стремятся получить $K_{wo} \rightarrow 1$.

Литература

1. Липаев В. В. Тестирование компонентов и комплексов программ. – М.: Синтег, 2010.

2. Журавлев А. В., Антимиров В. М.: Методика оценки эффективности отработочной позиции СУ РКТ // Труды первой Российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники». – Нижний Новгород: Нижегородское региональное отделение научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2013. – № 4. – С. 214 – 217.

3. Журавлев А. В., Шашмурин И. В., Петухов В. И., Хохряков В. А. Архитектура системы управления комплексом отработки аппаратуры и программ САУ РКТ // Ракетнокосмическая техника. Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов. – Вып. 2. – Екатеринбург: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова», 2013. – С. 16–26.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПЛОЩАДНЫХ СЪЕМОК ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

А. В. Сумароков, В. Н. Платонов

(ПАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева. Ракетно-космическая корпорация «Энергия»)

Аннотация. В работе рассматривается возможность обеспечения точностных характеристик стабилизации в режиме площадной съемки перспективного космического аппарата, при существующих ограничениях на управляющие моменты, создаваемые двухстепенными силовыми гироскопами и диапазон измерений датчика угловой скорости. Приводятся результаты математического моделирования динамики контура управления ориентацией подтверждающие выполнение заданных точностных характеристик.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космические эксперименты, Напор-Мини РСА, наведение, дистанционное зондирование Земли, двухосная платформа наведения, двухосные силовые гироскопы, космические гиродины, кинетический момент, стабилизация, угловая скорость, прецессия.

Введение

В настоящее время в ПАО РКК «Энергия» проводится ряд работ в области создания современных автоматических систем дистанционного зондирования Земли. В рамках этих работ как разрабатываются спутники дистанционного зондирования Земли [1, 2], так и задействуются возможности российского сегмента Международной космической станции [3, 4]. В данной работе рассматривается управление ориентацией перспективного космического аппарата (КА) с двухстепенными силовыми гироскопами в качестве основных исполнительных органов, предназначенного для съемки заданных районов земной поверхности с высоким пространственным разрешением (1,0 м при съемке в надир). Считается, что КА функционирует на круговой солнечно-синхронной орбите с высотой 650 км и наклонением 98°. В состав системы управления движением и навигации (СУДН) высокоманевренного КА также входят: три звездных датчика ASTRO APS, датчик угловой скорости ГИВУС (имеющий четыре измерительных канала), аппаратура спутниковой навигации АСН-Е, три электромагнитных исполнительных органа для сброса накопленного кинетического момента маховиков. При проведении наблюдений одновременно работают два звездных датчика.

Космический аппарат предназначен для проведения различных видов съемок: кадровая съемка, стереосъемка, площадная съемка, коридорная съемка, съемка полосы вдоль трассы.

Рассматривается перспективный космический аппарат дистанционного зондирования Земли с моментами инерции твердого тела вокруг осей X, Y, Z связанной системы координат равными соответственно: 800 кгм², 500 кгм², 800 кгм². При проведении наблюдений ось OY КА направлена на объект съемки, ось минус OZ КА по направлению бега местных предметов (вектор относительной скорости движения объектов наблюдения ортогонален оси X). В соответствии с требованиями, предъявляемыми к системе ориентации, при проведении съемки должны быть обеспечены точности стабилизации вокруг каждой из осей *X* и *Z* КА не более 0,001 °/с.

Использование гиродинов в системе управления движением КА позволяет резко увеличить количество съёмок в сеансах наблюдений, по сравнению с системой управления движением использующей маховики, рассмотренной в работах [1, 2]. Это достигается за счет того, что гиродины могут создавать управляющий момент на порядки превосходящий момент маховиков. Поэтому, набор и гашение угловой скорости при проведении разворотов КА происходят практически мгновенно. В результате, продолжительность программных разворотов значительно сокращается. Использование гиродинов также позволяет осуществлять площадные съемки, проведение которых невозможно при использовании маховиков. Вместе с тем, величина кинетического момента имеющихся в настоящее время в РФ гиродинов, превосходит требуемую для рассматриваемого КА приблизительно в четыре раза. Минимальное управляющее воздействие таких гиродинов на порядок превышает минимальное управляющее воздействие маховиков. Данное обстоятельство значительно затрудняет выполнение заданных точностных характеристик стабилизации КА при проведении съёмок. Другой проблемой для рассматриваемой системы управления КА является ограниченный диапазон измерительных каналов датчика угловой скорости ГИВУС: от минус 1,6 °/с до +1,6 °/с.



Рис. 1. Площадная съемка

В качестве анализа применимости выбранных гиродинов для данного КА рассматривается возможность обеспечения точностных характеристик стабилизации для наиболее динамичного режима – режима площадной съемки (рис. 1). Размер участка площадной съемки составляет 48 км × 60 км. Площадную съемку можно представить, как последовательность 4-х съемок полос 12×60 км² и трех разворотов в промежутках между съемками. Предположим, что первая съемка из 4-х производится вперед при угле тангажа равном $\upsilon = 30^{\circ}$ и, соответственно, 4-я заканчивается при съемке назад при угле тангажа равном минус υ . Длительность съёмки одной полосы составляет ~ 11 с. Требуемое время на проведение разворота составляет 22 с. Величина угла разворота при этом ~ 20°, причем, разворот проводится в основном по тангажу. За один сеанс наблюдений продолжительностью порядка 20 минут должно проводиться до 8 площадных съемок.

Оценивание точности стабилизации

В СУДН КА для управления ориентацией используются четыре гиродина с кинетическим моментом h = 60 Нмс каждый. Оси прецессии двух гиродинов (G1 и G2 на рис. 2) параллельны оси ОХ КА, двух других (G3 и G4 на рис. 2) параллельны оси ОУ КА (рис. 2).



Рис. 2. Схема установки гиродинов

Алгоритмы управления системой, включающей четыре гиродина с попарно параллельными осями прецессии, приведены в работах [5 - 8]. Область вариации кинетического момента данной схемы, проекции которой на плоскости *OXY*, *OXZ* и *OYZ* связанной системы координат изображены на рис. 3, имеет отчетливо выраженную вытянутую форму. Как видно из рис. 3, размеры области вариации по осям связанной системы координат *OX*, *OY*, *OZ* составляют ±120 Hмс, ±120 Hмс, ±240 Hм с соответственно. Для управления ориентацией данного КА будет использоваться только часть области вариации кинетического момента, не превышающая сферы с радиусом 60 Hмс и центром в начале области вариации кинетического момента, так как для приборов, входящих в контур управления ориентацией, максимальная допустимая угловая скорость составляет не более 3,5 °/c.

Для управления системой гиродинов используется закон управления скоростями прецессии системы, включающей п гиродинов, используемый ранее в контуре управления станции «Мир» [5, 7, 8]. Расчет требуемого управляющего момента гиродинов также осуществляется по алгоритмам, подобным, использовавшимся для орбитальной станции «Мир» [7, 8].



Рис. 3. Область вариации кинетического момента системы гиродинов

В процессе управления осуществляется максимизация управляющего момента, развиваемого системой гиродинов. Применительно к данному КА можно полагать, что во всей используемой для управления сфере, управляющий момент составляет не менее 30 Нм в произвольном направлении.

Как было указано ранее для измерений угловой скорости используется датчик ГИВУС, имеющий четыре измерительных канала (ИК), оси которых параллельны биссектрисам разных трехгранных углов связанной системы координат ОХҮХ КА. При расчетах угловой скорости будем исходить из следующего положения: для расчета угловой скорости КА требуется, чтобы хотя бы три ИК были в допустимом диапазоне измерений. В этом случае максимальная величина измеряемой угловой скорости будет зависеть от направления вектора абсолютной угловой скорости в осях связанной системы координат. Таким образом, максимальная величина измеряемой угловой скорости будет лежать в диапазоне от 1,96 °/с до 4,8 °/с.

Расчет максимальной допустимой угловой скорости разворотов проводится с учетом текущего направления оси вращения КА. Это делается с целью полного использования возможностей прибора. Ввиду того, что ИК ГИВУС имеют значительную шумовую составляющую, равную 0,45" (3о), в блоке оценки угловой скорости (наблюдателе) используется алгоритм динамической фильтрации [9, 10].

На стадии разработки СУДН перспективного КА были проведены расчеты частот и форм упругих колебаний конструкции КА. Наибольшее влияние на динамику КА по осям X и Z оказывают частоты колебаний солнечных батарей ~ 2 Гц. Поэтому для нивелирования влияния упругих колебаний конструкции на динамику объекта управления в контур управления был введен фильтр нижних частот на основе фильтра Баттерворта 2-го порядка.

С использованием теории оптимального управления [9, 10] были выбраны параметры управления, наблюдателя и фильтра упругих колебаний обеспечивающие заданные технические характеристики. В результате полоса пропускания регулятора составляет 1,2 рад/с. Полоса пропускания наблюдателя была выбрана равной 6 рад/с. Частота среза фильтра упругих колебаний составляет 6 рад/с.

Выбранные параметры обеспечивают заданные технические характеристики ориентации КА и стабилизацию упругих колебаний с учетом разбросов динамических характеристик.

Результаты математического моделирования

Для оценки точности стабилизации КА во время проведения площадных съемок, было проведено математическое моделирование. При моделировании использовались бортовые программы контура управления ориентацией. Шаг расчетов бортовой ЦВМ предполагался равным 0,2 с. Применялись циклограммы обмена бортового компьютера с моделью прибора ГИВУС и моделью гиродинов соответствующие протоколам обмена между реальной аппаратурой.

При проведении моделирования в динамической модели КА учитывались упругие тоны колебаний конструкции КА до 10 Гц с максимальными разбросами динамических параметров.

Максимальная задаваемая угловая скорость прецессии гиродина составляет 57,3 °/с, минимальная составляет 0,0069°/с. При моделировании считалось, что возможно задание любой скорости в диапазоне от минимальной до максимальной с шагом, равным минимальной скорости. Дополнительная, к динамике описываемой, ошибка отработки предполагалась равной ±(1 % + 0,0069 o/c) от заданной скорости. Учитывались возмущающие моменты, создаваемые приводами главной оси гиродинов в процессе поддержания скоростей вращения роторов.

На интервале времени от 200 до 400 секунд совершаются четыре разворота. В начале данного интервала КА ориентируется в дежурной инерциальной солнечной ориентации. На 220-й секунде задается разворот в ориентацию для съемки первой полосы участка наблюдений. Разворот для перехода на вторую полосу задается на 282-й секунде, разворот на третью полосу на 316-й секунде и разворот на четвертую полосу на 350-й секунде.



Рис. 4. Графики изменений компонент угловой скорости КА относительно требуемой угловой скорости при проведении площадной съемки в осях связанной системы координат



Рис. 5. Окончание четвертого разворота и переходный процесс перед съемкой

Разворот и переходный процесс завершаются через 15 с после начала разворота, примерно за 6 – 7 с до начала съемки. Из рисунков видно, что при проведении съемок по всем осям КА обеспечиваются угловые скорости стабилизации менее 0,001 °/с.

Заключение

В докладе рассмотрен режим наблюдений перспективного КА при проведении площадных съемок. В системе управления движением и навигации в качестве исполнительных органов используются двухстепенные силовые гиродины, величина кинетического момента которых превышает требуемую для данного КА приблизительно в четыре раза. Измерительные каналы датчика угловой скорости имеют недостаточный для КА дистанционного зондирования Земли диапазон измерений.

В контуре управления ориентацией КА выбраны параметры управления, наблюдателя и фильтра упругих колебаний, обеспечивающие заданные технические характеристики. Приведенные результаты математического моделирования подтверждают возможность выполнения режима площадной съемки и требуемые точности стабилизации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01635.

Литература

1. Богачев А. В., Платонов В. Н., Тимаков С. Н. Анализ возможности обеспечения точностных характеристик стабилизации перспективного космического аппарата, предназначенного для дистанционного зондирования Земли. Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – № 2. – С. 83 – 89.

2. Платонов В. Н. О точности стабилизации космического аппарата дистанционного зондирования земли без использования информации инерциальных датчиков // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 3. – С. 33 – 38.

3. Сумароков А. В. Наведение камеры высокого разрешения при видеосъёмке поверхности земли с МКС. // Навигация и управление движением. Материалы XVII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» / Науч. редактор д.т.н. проф. О. А. Степанов / Под. общ. ред. Академика РАН В. Г. Пешехонова. – Спб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С. 561 – 568.

4. Сумароков А. В. О наведении камеры высокого разрешения, установленной на борту МКС, посредством двухосной поворотной платформы. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2016. – № 4. – С. 85 – 97. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-4-85-97.

5. Платонов В. Н. Закон управления системой гиростабилизаторов // Труды V научнотехнической конференции молодых специалистов предприятия / НПО «Энергия», 1977. – С. 57 – 69.

6. Crenshaw J. W. 2-speed, a single-gimbal moment gyro attitude control system. AIAA Pap. – 1973. – N 895.

7. Кульба В. В., Микрин Е. А., Павлов Б. В., Платонов В. Н. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов. – М.: Наука, 2006.

8. Платонов В. Н., Сумароков А. В. Обеспечение точностных характеристик стабилизации перспективного космического аппарата при проведении площадных съемок поверхности Земли // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 3. – С. 125 – 132.

9. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1973.

10. Александров В. В., Болтянский В. Г., Лемак С. С., Парусников Н. А., Тихомиров В. М. Оптимальное управление движением. – М.: Физматлит, 2005. – 376 с.

11. Bong Wie, David Bailey, Christopher Helberg. Rapid Multitarget Acquisition and Pointing Control of Agile Spacecraft // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2002. – Vol. 25. – No 1.

ВИРТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ В КОНЦЕПЦИИ КА «ПРИБОР – СПУТНИК»

А. А. Пономарев, Л. Н. Сигал (АО «НИИЭМ»), И. Д. Родионов (ЗАО НТЦ «Реагент»)

Аннотация. Обсуждается концепция «прибор – спутник», где источником координат КА и видеоданных взята бортовая аппаратура дистанционного зондирования. Иллюстрируется улучшение параметров системы ориентации КА «КОРОНАС-ФОТОН», под управлением рентгеновским телескопом «ТЕСИС». Для КА ДЗЗ предлагается ввести в оптическую схему видеокамеры астрометрическую систему гидирования, на базе астродатчика режима счета фотонов. Точные координаты кадра видеоданных и ориентация КА устанавливаются с помощью бортовых ITтехнологий, определяемых в качестве виртуальной системы ориентации. На примере КА «Михайло Ломоносов» отмечена актуальность Интернет-связи в составе КА. Ключевые слова: ДЗЗ, виртуальная система ориентации КА.

В концепции УКП, господствующей в Роскосмосе, целевая аппаратура (ЦА) – аппаратура Д33, связи и научные приборы, рассматривается в качестве одностороннего потребителя услуг служебной платформы, получаемых в виде стандартных интерфейсов питания, командной и информационной радиолиний, ориентации и других. Для решения ряда задач ЦА вынуждена принимать альтернативные решения, парирующие ограничения ряда параметров УКП, в том числе и по точности ориентации КА. Примером может служить КА «КОРОНАС-ФОТОН», использовавший в качестве УКП служебную платформу КА «Метеор».

В КА «КОРОНАС-ФОТОН» рентгеновскому телескопу «ТЕСИС» для целей юстировки, перемещения свой оптической оси по диску Солнца и калибровки 2-х координат изображения, потребовалось регулирование ориентации в диапазоне углов 1 – 10 угл. мин, при стабилизации ~ 1 угл. с/с. Тогда, как система ориентации КА обеспечивала только *одноосную* ориентацию, с точностью 5 угл. мин, стабилизацией ~ 20 угл. с/с, при амплитуде колебаний 1 угл. мин. [1].

Наличие астродатчиков в ТЕСИС позволило ввести в КА режим коррекции (РК) – смещение курсовой оси КА по двум ортогональным осям, управлением от телескопа. Определение текущих координат оси и выработка управляющих сигналов производилось *a posteriori*, по изображению в картинной плоскости телескопа [1].

Для парирования вращения КА вокруг оси (дрейфа) был введен экспериментальный режим (РЭ) *трехосной* ориентации КА, также под управлением ТЕСИС, обеспечивающий необходимую ориентацию КА на приемные станции [1].

Обобщая результаты ЛКИ, можно констатировать, что вся совокупность работ по изменению структуры, параметров и целей системы ориентации реализовала *de facto* концепцию КА «Прибор – Спутник». В этой концепции пассивная роль «*полезной* нагрузки» УКП сменяется активной, ведущей ролью ЦА в бортовом комплексе управления и других системах платформы.

Достигаемая точность системы ориентации УКП всегда ограничена по исполнительным органам, запасу устойчивости и другим параметрам. Так, в режимах РК и РЭ КА «КОРОНАС-ФОТОН» затянулись переходные процессы и увеличилась колебательность при сильных возмущениях (на выходе из тени и перенацеливании). Технологии сигнального (физического) уровня изменений средствами ЦА структуры и параметров системы ориентации в настоящее время более эффективно могут быть заменены информационными технологиями. При этом для ЦА обеспечивается робастность к параметрам УКП.

Проблемы прецизионной ориентации и стабилизации, особенно важные для ДЗЗ детальной съемки, предлагается решать виртуально – распознаванием образов в видеоданных ЦА [2]. Так, впервые предложенная (И. Д. Родионов, 1997 г.) схема виртуальной нониусной ориентации и наведения (рис. 1) осуществляет координатную привязку изображений ЦА с помощью встроенного в оптическую схему ЦА астродатчика (АД).

В отличие от метода использования видеоданных в [3] (непригодного в реальном времени), предлагаемая схема избавляет от необходимости использования наземных опорных точек, всегда зашумленных, и избегает некорректных задач вычисления направляющих косинусов. Выигрыш состоит и в ожидаемой точности – угловые секунды вместо минут.



Рис. 1. Схема ориентации и наведения УФ, ВИД и ИК видеоспектрометра

Предлагаемая виртуальная система ориентации и наведения КА основана на технологиях внеатмосферной астрометрии. Для внеатмосферных телескопов используется та же система наведения и слежения, что и для земных – так называемая система гидирования. Роль «гида» выполняет встроенный в телескоп астродатчик. Как правило, применяется офсетное гидирование, где детекторы АД и телескопа хотя и находятся в одной фокальной плоскости, но взаимно, по конструктивным ограничениям, значительно смещены. Наведение и слежение осуществляется бортовым компьютером, по рабочему астрометрическому каталогу, с использованием матрицы перехода между системами координат гида и телескопа. В наведении и стабилизации участвуют два контура – грубый (платформы КА) и точный, нониусный (контур гида). Инструментальные погрешности и уходы, обусловленные деформациями конструктивов и другими причинами, в астрометрии обычно устраняются наземной цифровой коррекцией изображений, *post factum* – по астроориентирам и данным гироинерциальной системы КА.

На низкоорбитальных КА высокодетального ДЗЗ, при требованиях секундных и субсекундных точностей стабилизации и сбросе данных в реальном времени, коррекция должна быть обеспечена непосредственно на борту. Известно, что алгоритмически такая коррекция осуществляется на КА «Tacsat-3», в общей системе бортовой обработки данных.

При наведении и слежении за выделенной группой точечных или протяженных объектов Д33 необходима привязка к некоторому физическому телу, базису опорной системы координат. Для навигации УКП опорной системой координат выбирают созвездия GPS/ГЛОНАСС, для системы стабилизации и ориентации также используют бесплатформенную (гироскопическую) инерциальную навигационную систему, периодически корректируемую по астроориентирам. Проблема дискретности астродатчиков УКП решается экстраполяцией – фильтрами Калмана.

Конструкционной жесткости УКП становится недостаточно для решения проблемы связи ЦА и АД в традиционной схеме. В итоге, прямое (реального времени) использование множества данных ориентации УКП в видео ДЗЗ становится затруднительным. При гидировании проблема снимается. Отличие технических решений приводит к различию астрометрических требований к АД УКП и ЦА. Приведем здесь некоторые данные из технических предложений в Федеральную Космическую Программу РФ 2015 – 2025 гг.

В астродатчиках УКП источниками бортового опорного каталога обычно служат различные версии Тусho. В астродатчике гида ЦА виртуальной системы астрометрическая и фотометрическая точность должна быть выше, поэтому привлекается каталог Ніррагсоs. Чувствительность звездной величины 9^{*m*} (резерв до 12^{*m*}) обеспечивает МКП детектор режима счета фотонов, аналогичный основным детекторам оптических каналов ЦА (разрешение УФ и ВИД < 1 нм, быстродействие 100 пс). Понятия «быстрый» и «высокоточный» для АД гармонизируются, что позволяет определять небесные координаты выделенной группы объектов в кадре Д33 бортовым ПО. Положение оси ЦА может быть определено с точностью до 10⁻⁶ рад [4].

Редукция результатов измерений в небесной опорной системе и GPS/ГЛОНАСС к земной геодезической требует сложных процедур пересчета – определения матриц прецессии, нутации, вращения Земли, возмущений атмосферы, Луны, Солнца и ряда других, включая параметры собственной динамики КА. Все указанные параметры требуют поправок по регулярным наблюдениям. Так, для КА с высотой орбиты 500 км, для детальной съемки разрешением 2 м, требуются еженедельные поправки баллистических констант бортового ПО.

Независимая от УКП виртуальная, «математическая» платформа ЦА, сосредотачивая весь объем вычислений на борту, позволит упростить ряд сложных процедур пересчета. Отметим, что попутно в УКП может быть устранен вспомогательный комплект маховиков «точного» (уровня нескольких угловых минут) наведения и стабилизации платформы ДЗЗ.

Интеллектуализация борта КА сопряжена не только с введением в состав ЦА новых инструментальных средств и достаточно мощной FLOPS бортовой ЭВМ, но и собственной, автономно от УКП, системы связи. Виртуальная система ориентации в состоянии обеспечить реализацию функций «виртуальный владелец КА» – когда полетное задание на съемку Земли формирует произвольный потребитель. В этих целях, в состав ЦА должен быть введен модем Интернет канала GlobalStar или другой подобной системы космической связи. Операции реального времени снизят цену и оптимизируют лётную квалификацию виртуальной системы, ускорят отработку алгоритмов бортовой дешифровки и сжатия сцен ДЗЗ.

Технологии Интернет-управления ЦА в реальном времени через модем бескорпусного *наземного* исполнения GSP-1720 GlobalStar (команды, телеметрия, загрузка бортового ПО) эффективно подтверждены годичным опытом эксплуатации КА «Михайло Ломоносов», к сожалению не получившем освещения в научных публикациях.

Литература

1. Юров В. Н., Тышкевич В. Г. Комплекс научной аппаратуры космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН. Уроки эксплуатации // ИКИ. Труды семинара «Результаты космического эксперимента КОРОНАС-ФОТОН. Предложения по продолжению программы КОРОНАС: научные задачи и аппаратура» / ИКИ. – М., 2012. – 211 с.

2. Rodionov Igor [et al.] The Microsatellite for Remote Exploration of Environment // SPIE. – Vol. 3119 – 11.

3. Зеленин Е. А. Определение пространственной ориентации космического аппарата «Метеор-М» № 2 и фотограмметрических параметров целевой аппаратуры по целевой информации комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС-М) // Тезисы докладов четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем ДЗЗ». – М., 2016. – С. 44 – 46.

4. Белов А. А. [и др.] Малый космический аппарат «Астрогон-Вулкан» гиперспектрального дистанционного мониторинга высокого разрешения // ИПМех РАН. Препринт № 726. – М., 2003. – 32 с.

АНАЛИЗ ПРИОРИТЕТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРСПЕКТИВНОЙ РОССИЙСКОЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ, РЕШАЮЩЕЙ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА В ИК-ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Р. В. Андреев, Н. П. Акимов, Ю. М. Гектин, А. А. Зайцев, С. М. Зорин, А. В. Рыжаков, М. Б. Смелянский, Д. О. Трофимов (AO PKC)

Аннотация. В связи с расширением круга решаемых потребителями задач, актуальным представляется проведение работ по систематизации и оптимизации требований к параметрам бортовых ИК-радиометров, определяющих целевые характеристики съемочной аппаратуры с учетом уже накопленного опыта ее создания как в нашей стране, так и за рубежом. В представленной статье рассмотрены передовые технические требования к ИК-аппаратуре по трем направлениям космической деятельности: аппаратура гидрометеорологического и океанографического назначения; целевая аппаратура среднего пространственного разрешения глобального мониторинга чрезвычайных ситуаций (обнаружение и идентификация очагов лесных пожаров и высокотемпературных объектов естественного и техногенного происхождения); целевая аппаратура высокого пространственного разрешения для природоресурсного и локального теплового мониторинга.

Ключевые слова: бортовые инфракрасные радиометры; мониторинг в инфракрасном диапазоне; перспективная целевая аппаратура; спектрозональная съемка Земли.

Введение

В России в настоящее время находятся в эксплуатации и разработке многоспектральные инфракрасные (ИК) радиометры для космических аппаратов (КА) различного назначения (гидрометеорологического, природоресурсного, чрезвычайных ситуаций и т. д.), которые позволят обеспечить отечественных потребителей независимой видеоинформацией в диапазоне спектра от 3,5 до 14 мкм.

В связи с расширением круга решаемых задач средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) актуальным представляется проведение работ по систематизации и оптимизации требований к параметрам бортовых ИК-радиометров, определяющих целевые характеристики съёмочной аппаратуры с учетом уже накопленного опыта ее создания как в нашей стране, так и за рубежом. Выполнение такой работы позволит более эффективно проводить развитие и модернизацию приборного ряда бортовых ИК-радиометров на период 2017 – 2025 гг. и сосредоточить усилия на первоочередных разработках ключевых элементов для ее создания.

Современная целевая аппаратура (ЦА) космических комплексов (КК) Д33 является сложной многофункциональной системой, обеспечивающей одновременно решение многих задач. Области применения космических систем Д33 инфракрасного диапазона предполагают обеспечение Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также соответствующих служб МЧС, Министерства природных ресурсов РФ, Минсельхоза России, Росрыболовства, Росреестра, Россельхоза и включают:

- анализ и прогноз погоды в региональном и глобальном масштабах;

- анализ и прогноз состояния акваторий морей и океанов;

- анализ и прогноз условий для полетов авиации;

- мониторинг климата и глобальных изменений;

 обнаружение и контроль природных и техногенных катастроф и чрезвычайных ситуаций;

 обнаружение лесных и подземных пожаров, крупных выбросов загрязняющих веществ в природную среду;

- экологический контроль окружающей среды;

 – обеспечение глобального мониторинга в интересах метеорологии, климатологии и оценки биоресурсов;

 исследования вулканической деятельности и прогнозирования сейсмической активности;

- исследования динамики зон вечной мерзлоты;

 – оценку состояния полигонов захоронения промышленных и бытовых отходов и их влияния на окружающую среду;

 – различные виды тематического картографирования земной поверхности, в том числе геологическое картирование (поиски полезных ископаемых, их идентификация, обнаружение возможных районов газовых и нефтяных месторождений).

В данной статье рассмотрены приоритетные требования к аппаратуре по трем направлениям космической деятельности, решающие задачи гидрометеорологического и океанографического мониторинга, мониторинга природных ресурсов и чрезвычайных ситуаций в среднем и тепловом ИК-диапазоне спектра (от 2,5 до 15 мкм):

 – ЦА малого пространственного разрешения гидрометеорологического и океанографического назначения.

 – ЦА среднего пространственного разрешения глобального мониторинга чрезвычайных ситуаций (обнаружение и идентификация очагов лесных пожаров и высокотемпературных объектов естественного и техногенного происхождения).

 – ЦА высокого пространственного разрешения для природоресурсного и локального теплового мониторинга.

Требования к аппаратуре гидрометеорологического и океанографического назначения

Анализ приоритетных требований к перспективной российской гидрометеорологической аппаратуре, на основе изучения общемировых тенденций и требований российских потребителей, показывает, что создаваемая гидрометеорологическая аппаратура к периоду 2020 – 2030 гг. должна иметь более высокие технические характеристики по отношению к эксплуатируемой в настоящее время:

- количество спектральных каналов - от 17 до 20;

- спектральный диапазон съемки от 0,3 до 15 мкм;

 ширина спектральных диапазонов – от 15 до 50 нм в видимом и ближнем ИК-диапазонах и от 300 до 600 нм в среднем и дальнем ИК-диапазоне;

 пространственное разрешение для комплексов на солнечно-синхронной орбите – 0,5 км в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра и не менее 2 км в ИК-диапазоне для геостационарных КА;

 периодичность формирования информации: для низкоорбитальных систем – непрерывная, для геостационарных – не более 10 мин. К важнейшим требованиям при разработке современной аппаратуры следует так же отнести:

- увеличение времени эксплуатации аппаратуры в штатном режиме до 10 лет;

 обеспечение долговременной стабильности радиометрических параметров и точности выполняемых измерений.

Анализ задач, решаемых аппаратурой ДЗЗ (климатология, метеорология, контроль состояния окружающей среды и т. д.), показывает, что она должна обеспечивать очень высокие требования по точности и стабильности измерений, причем эти требования неуклонно возрастают. Наиболее высокие требования к долговременной стабильности и точности измерений оптической аппаратурой предъявляет климатология, для которой необходимо накопление временных трендов рядов данных на протяжении десятилетий. По результатам регистрации изменений климатических переменных можно судить о глобальных изменениях климата.

Требования к спектральной области отраженного солнечного излучения в диапазоне от 0,3 до 2,5 мкм выражаются в относительных единицах (%), а в диапазоне от 3 до 14 мкм в абсолютных (К). Требуемые значения стабильности лежат в пределах от 0,1 до 1 %/десятилетие и от 0,01 до 0,2 К/десятилетие. При разработке бортовых устройств контроля стабильности в перспективной аппаратуре Д33 нужно ориентироваться на более высокие значения: 0,1 %/десятилетие и 0,01 К/десятилетие.

В 2010 году, в соответствии с Федеральной космической программой России на 2006 – 2015 годы, началась разработка гидрометеорологического и океанографического космического комплекса мониторинга Земли четвертого поколения «Метеор-МП» [1], составной частью которого стало перспективное многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР-МП, разработанный в АО «Российские космические системы» (рис. 1) [2].

Требования к тактико-техническим характеристикам МСУ-МР-МП были уточнены и скорректированы, следующим образом (табл. 1) [3]:

пространственное разрешение – 0,5 км.

 – полоса обзора – ≥ 2950 км при угле обзора от 110 до 111° при высоте орбиты КА 820 км;

- количество информационных каналов - от 18 до 20;

– разрядность выходного сигнала МСУ-МР-МП – 12 бит/пиксель.



Рис. 1. Пространственная модель МСУ-МР-МП-ВД (слева) и МСУ-МР-МП-ИК (справа)

Таблица 1

№ канала	Границы спектрального диапазона по уровню 0,5, мкм	Центральная длина волны, мкм	Ширина спектрального диапазона, нм	Сигнал/шум@яркость на центральной длине волны, Втм ⁻² ср ⁻¹ мкм ⁻¹
1	$0,402\pm0,015-0,422\pm0,015$	0,412	20	340@ 95
2	$0,433 \pm 0,015 - 0,453 \pm 0,015$	0,443	20	420@ 80
3	$0,480\pm0,015-0,500\pm0,015$	0,490	20	390@ 60
4	$0,545 \pm 0,015 - 0,565 \pm 0,015$	0,555	20	350@ 34,5
5	$0,600 \pm 0,015 - 0,680 \pm 0,015$	0,640	80	400@ 21
6	$0,662 \pm 0,015 - 0,682 \pm 0,015$	0,672	20	220@ 17
7	$0,732\pm0,015-0,762\pm0,015$	0,747	30	200@ 11,2
8	$0,845 \pm 0,015 - 0,885 \pm 0,015$	0,865	40	260@ 6,6
9	1,23±0,02 - 1,26±0,02	1,245	30	500@ 114,6
10	1,36±0,02 - 1,39±0,02	1,375	30	500@ 88,7
11	1,58±0,02 - 1,64±0,02	1,61	60	500@ 61
12	2,225±0,02 - 2,275±0,02	2,25	50	Требование формируется после приобретения прием- ника излучения для данного спектрального диапазона
13	3,5±0,2-4,1±0,2	3,8	600	0,2K@ 300K ¹⁾
14	$3,975\pm0,2-4,13\pm0,2$	4,05	155	0,5K@ 300K ²⁾
15	$7,2\pm0,2-7,7\pm0,2$	7,45	500	0,1K@ 300K
16	$8,4\pm0,2-8,9\pm0,2$	8,65	500	0,1K@ 300K
17	9,51±0,2-9,81±0,2	9,66	300	0,15K@ 300K
18	$10,2\pm0,2-11,2\pm0,2$	10,7	1000	0,1K@ 300K
19	11,5±0,2-12,5±0,2	12,0	1000	0,1K@ 300K
20	13,485±0,2-13,785±0,2	13,635	300	0,1K@ 300K

Требования к спектральным характеристикам МСУ-МР-МП

¹⁾ Канал 13 настраивается на максимальную температуру около 350К (для детектирования пожаров).

²⁾ Канал 14 настраивается на максимальную температуру 480 – 550К (для детектирования пожаров).

В 2010 году в соответствии с Федеральной космической программой России на 2006 – 2015 гг. началась разработка геостационарной гидрометеорологической космической системы третьего поколения «Электро-М» [4], составной частью которого стала разработка перспективного геостационарного многозонального сканирующего устройства МСУ-ГСМ (рис. 2) [5].

Основные технические характеристики и требования к спектральным каналам аппаратуры МСУ-ГСМ перспективной аппаратуры МСУ-ГСМ [5], приведены в табл. 2 и 3.

Технические требования к перспективной российской аппаратуре МСУ-МР-МП и МСУ-ГСМ, разработка которой ведется в настоящее время АО «Российские космические системы», полностью соответствуют параметрам перспективной зарубежной аппаратуры, разрабатываемой в настоящее время, и позволят получить объем необходимой гидрометеорологической и океанографической информации на современном уровне [6, 7].



Рис. 2. Предварительные пространственные модели устройств МСУ-ГСМ-ВД, МСУ-ГСМ-ИК1 и МСУ-ГСМ-ИК2

Таблица 2

Основные технические характеристики МСУ-ГСМ

Параметр	Значение	
Количество спектральных каналов в видимом, ближнем инфракрасном и дальнем инфракрасном диапазоне	20	
Спектральный диапазон, мкм	0,35 - 15	
Пространственное разрешение, км – в диапазоне от 0,35 до 2,5 мкм – в диапазоне от 3 до 15 мкм	0,5 – 1 (предпочтительно 0,5 км) 1 – 2 (предпочтительно 1 км)	
Периодичность съемки, мин – в штатном режиме (съемка полного диска Земли) – в учащенном режиме (фрагментарная съемка диска Земли)	10 5	
Таблица 3

				. , ,
N⁰	Центр	Границы канала	Радиометриче-	
кана-	канала,	(по уровню 0,5),	ская точность	Решаемые задачи
ла	МКМ	МКМ	$(D/N, \Delta T)$	
1	0,38	0,350 - 0,410	25	Аэрозоль
2	0,44	0,410 - 0,470	25	NO ₂ , хлорофилл
3	0,510	0,485 - 0,535	25	Ветер, облака, лед
4	0,645	0,605 - 0,685	30	Ветер, облака, растительность
5	0,860	0,825 - 0,895	30	Ветер, аэрозоль, растительность
6	0,960	0,930 - 0,990	12	Влажность
7	1,375	1,360 - 1,390	40	Детектирование перистых облаков
8	1,610	1,580 - 1,640	30	Различие снега и облаков
9	2,260	2,235 - 2,285	25	Фазовый сдвиг облаков
10	3,80	3,60-4,00	0,1K	Пожары, различие снега и облаков
11	6,30	5,80-6,80	0,3К	Ветер, влажность
12	7,35	7,10-7,60	0,3К	Ветер, влажность
13	8,7	8,30 - 8,90	0,1K	Общее содержание H ₂ O, фазовый
				сдвиг облаков
14	9,66	9,51 - 9,81	0,3К	Общее содержание озона
15	10,50	10,15 - 10,85	0,1K	Облачность, температура поверх-
				ности, вулканический пепел
16	12,3	12,05 - 12,55	0,2К	Температура поверхности, вулка-
				нический пепел
17	13,3	13,00 - 13,60	0,2К	Высота облаков
18	13,65	13,35 - 13,95	0,2К	Высота облаков, нижний ярус
19	13,95	13,65 - 14,25	0,3К	Высота облаков, нижний ярус
20	14,25	13,95 - 14,55	0,3K	Высота облаков, нижний ярус

Характеристики спектральных каналов МСУ-ГСМ и решаемые задачи

Требования к аппаратуре глобального мониторинга чрезвычайных ситуаций

Анализ задач, стоящих перед интегрированной системой слежения с лесопожарной обстановкой, показывает, что космическая подсистема должна быть задействована на всех этапах мониторинга лесопожарной обстановки. В соответствии с указанными задачами космическая информационная система должна отвечать следующим требованиям [8]:

а) Обеспечивать выявление зарождающихся пожаров площадью до 0,01 гектара $(10 \times 10 \text{ м})$ с вероятностью не менее 0,9 при вероятности ложных тревог не более 0,01 в любой пожароопасной зоне, ограниченной 40 и 70° с. ш. и 20 и 170° в. д. при облачности от 5 до 7 баллов.

Точность определения координат очагов пожаров должна быть не хуже 0,5 км.

б) При разведке действующих лесных пожаров система должна обеспечивать:

– синхронное картирование полей излучения крупных (более 25 га) пожаров и прилегающих территорий в ближней, средней и тепловой ИК-области спектра с относительной радиометрической погрешностью до 2%, точностью пространственной привязки до 200 м, периодичностью обновления информации в дневное время 3 – 4 часа для активно охраняемой территории и 24 часа для пассивно охраняемой;

 – определение направления и скорости продвижения фронта пожара с погрешностью до 20° и 50 м/ч;

измерение интенсивности тепловыделения кромки пожара (верхового и низового)
 с погрешностью до 15% от динамического диапазона;

 – картирование зон задымления в районах действия массовых и крупных пожаров с погрешностью привязки границ до 2 км.

в) Для оценки нанесенного ущерба и мониторинга лесных территорий, пройденных крупными лесными пожарами, космическая система должна обеспечивать многозональную спектрозональную съемку в диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм с пространственным разрешением от 2 до 10 м, погрешностью привязки – от 50 до 100 м и измерения площадей до 10%, с отклонениями от заказанных дат съемки не более 2 – 3 недель и задержкой съемочных материалов не более 20 суток с даты съемки.

Анализ требований к ИК-аппаратуре слежения за лесопожарной обстановкой показывает следующее:

1) Аппаратура должна иметь технические характеристики:

- количество спектральных каналов - не менее 2;

- спектральные диапазоны съемки от 3,5 до 4,1 и от 8 до 10 мкм;

пространственное разрешение – 100 – 200 м;

полоса обзора – не менее 2000 км.

2) Требования к аппаратуре должны согласовываться с основными потребителями информации (Министерством РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, министерством природных ресурсов и экологии РФ) они же должны выступать, как основные заказчики аппаратуры.

 Базовые элементы создаваемой аппаратуры должны производиться российскими предприятиями.

 Разработка аппаратуры должна осуществляться при максимальном использовании существующего задела разработчика.

5) На этапе создания штатной системы слежения за лесопожарной обстановкой необходимо либо дополнить комплекс широкозахватной аппаратурой, обеспечивающей съемку с разрешением не хуже 50 м в видимом и ближнем ИК-диапазоне, либо включить в состав ИК-радиометра модуль видимого диапазона.

В 2006 – 2012 гг. в АО «Российские космические системы» разработан радиометр МСУ-ИК-СР (многозональное сканирующее устройство среднего пространственного разрешения ИК диапазона), для оперативного глобального мониторинга природных и техногенных высокотемпературных объектов на территории России в интересах федеральных служб и ведомств РФ (рис. 3) [9].

Радиометр МСУ-ИК-СР обеспечивает получение информации в двух спектральных диапазонах (от 3,5 до 4,1; от 8 до 12 мкм) с пространственным разрешением 200 м в полосе обзора 2000 км, которая обеспечивает межвитковое перекрытие изображений территории России на широтах выше 40°. В качестве приемников излучения в МСУ-ИК-СР применены отечественные ПЗС линейки формата 4×288 элементов (размер элемента 25×25 мкм), охлаждаемые до 80 К активными микрокриогенными системами. Радиометр относится к классу оптико-механических сканирующих устройств, так как требуемая полоса обзора обеспечивается вращающимся двухсторонним сканирующим зеркалом.

Модернизированный вариант радиометра (МСУ-ИК-СРМ) установлен на КА «Канопус-В-ИК», и позволит отработать технологию мониторинга лесных пожаров с помощью специализированной аппаратуры [10].



Рис. 3. Пространственная модель радиометра МСУ-ИК-СР

Требования к аппаратуре природоресурсного и локального теплового мониторинга

Получаемая информация от оптико-электронной аппаратуры, обеспечивающей получение многозональных изображений в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра с пространственным разрешением от 0,4 до 1,0 м при полосе захвата от 10 до 30 км помогает при проведении следующих работ (табл. 4) [11]:

- геологоразведка;
- тепловой мониторинг городов;
- экологический мониторинг различных природных объектов;
- выявление утечек тепла в теплотрассах;
- обнаружение разрывов и утечек в нефтегазопроводах;
- обнаружение локальных загрязнений водных поверхностей;
- обследование линий электропередач и т. д.

В настоящее время в России разработано два ИК-радиометра (рис. 4, 5) с пространственным разрешением 30 м (АО «Российские космические системы» и ФГУП ЦНИИмаш [12]). Тактико-технические характеристики радиометров представлены в табл. 5. Радиометры относятся к классу оптико-механических многострочных сканирующих устройств (за один скан формируется микрокадр) [13, 14].

Таблица 4

пи-днапазона и греоования к неи									
Потенциальные потребители	Требуемое пространственное разрешение, м	Требуемое температурное разрешение, К	Спектральный диапазон, мкм	Количество. каналов					
Картирование геологических образований	5 - 100	0,1-0,2	от 9,5 до 10,5 от 8 до 14 от 9,45 до 10,55 9,7	4					
Гидрология, гляциология, криолитология	10 - 100	0,1-0,2	от 8 до 14 от 9,5 до 10,5 от 3 до 5 10,0	5					
Сельское хозяйство	5-60	0,1-0,5	от 8 до 9 от 9,1 до 9,2	2					
Геоботаника и лесное хозяйство	5-40	0,1-0,2	от 9,5 до 10,0	2					
Экология и охрана окружающей среды	10 - 50	0,1-0,5	от 8 до 14	5					
Океанология	50 - 100	0,1-0,2	от 10,3 до 12,5	2					
Контроль стихий- ных бедствий и ЧС	2-80	0,1-0,5	от 3,4 до 12,5	6					

Потенциальные сферы использования информации аппаратуры ИК-диапазона и требования к ней



Рис. 4. Пространственная модель радиометра АО «Российские космические системы»



Рис. 5. Пространственная модель радиометра ФГУП ЦНИИмаш

Таблица 5

Основные тактико-технические характеристики радиометров высокого разрешения, разработанных в России

Наименование параметра	МСУ-ИК-ВР АО «Российские кос- мические системы»	Радиометр ФГУП ЦНИИмаш
1. Количество спектральных диапазонов	2	6
2. Номинальные значения границ спектраль-	3,5-4,1	3,5-4,1
ных зон по уровню 0,5, мкм	8,1-9,1	8,1-8,45
		8,45 - 8,8
		8,90 - 9,25
		10,3 - 11,3
		11,5 – 12,5
3. Полоса захвата, км	96	158
4. Пространственное разрешение, м	30	30
5. Эквивалентная шуму разность измеряе-		
мых температур на уровне 300К, К		
– в среднем ИК-диапазоне	≤0,2	≤0,1
– в дальнем ИК-диапазоне	0, 1 - 0, 2	
6. Габариты, мм	$1150 \times 730 \times 420$	-
7. Масса, кг	≤90	150

Заключение

Анализ общемирового развития аппаратуры Д33 и современных требований потребителей информации, а также перспектив развития технологий создания ее ключевых элементов показывает, что для современного этапа развития аппаратуры, осуществляющей целевой мониторинг (гидрометеорологический и океанографический, природоресурсный и чрезвычайных ситуаций) в инфракрасной области спектра, эффективность съемочной информации, которая является обобщенным показателем информативности и достигается [15]:

- увеличением объема получаемой информации;

 – расширением спектрального диапазона съемки, включая увеличение числа спектральных каналов;

повышением пространственного и радиометрического разрешения;

– увеличением времени штатной эксплуатации аппаратуры;

 обеспечением долговременной стабильности радиометрических параметров и точностью выполняемых измерений.

Реализация данных тенденций потребует в период 2017 – 2025 гг. создания аппаратуры с более высокими техническими характеристиками по отношению к эксплуатируемой в настоящее время, не менее чем в 2 раза.

Литература

1. Чуркин А. Л. Гидрометеорологический и океанографический космический комплекс четвертого поколения «Метеор-МП» // Геоматика, 2011. – Выпуск 2.

2. Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Рыжаков А. В., Смелянский М. Б., Фролов А. Г. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Т. 2. – Выпуск 4.

3. Патент № 2306583 РФ. G02B 23/12. Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображений в широком угле обзора / Акимов Н. П., Гектин Ю. М., Новиков М. В., Смелянский М. Б. Заявл. 12.12.2005. Опубл. 20.09.2007.

4. Андреев Р. В., Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Зайцев А. А., Рыжаков А. В., Смелянский М. Б., Сулиманов Н. А., Фролов А. Г. Многозональное сканирующее устройство для геостационарного метеоспутника «Электро-Л» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Т. 2. – Вып. 3.

5. Асюшкин В. А. Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / под общ. ред. Г. М. Полищука, К. М. Пичхадзе. – М.: МАИ-Принт, 2010.

6. Csiszar I., Schroeder W., Giglio L., Ellicott E. Justice C.O. Latest results of the development and evaluation of the Suomi NPP VIIRS active fire products / NOAA/NESDIS, Center for Satellite Applications and Research, Camp Springs, 2014.

7. Schmit Timothy J. The ABI on GOES-R / Center for Satellite Applications and Research, New Orleans, LA, 2011.

8. Ершов Д. В., Коровин Г. Н., Лупян Е. А., Мазуров А.А., Тащилин С. А. Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сборник научных статей. – М.: Полиграф Сервис. – 2004. – Вып. 1. – С. 47 – 57.

9. Патент № 2324151 РФ. G01J 3/06. Многоканальный радиометр с широким углом обзора / Акимов Н. П., Гектин Ю. М., Смелянский М. Б., Фролов А. Г. Заявл. 11.09.2006. Опубл. 10.05.2008.

10. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В-ИК» / ФГУП ВНИИЭМ, 2011.

11. Шухостанов В. К., Цыбанов А. Г., Ведешин Л. А. Изменение оптического увеличения и пространственного разрешения снимков ДДЗ для задач космической диагностики объектов техносферы: Сб статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса / ИКИ. – М., 2007.

12. Дмитриев А. К., Кукина Г. В., Лопатин В. Г., Пронин Ю. С., Сырых Ю. П. Проектно-конструкторские особенности построения многоспектрального широкозахватного

ИК-радиометра высокого разрешения //Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии 2015. – М., 2015.

13. Понаморенко П. А., Филачев А. М. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946 – 2016). – М.: Физмат книга, 2016.

14. Акимов Н. П., Гектин Ю. М., Смелянский М. Б., Фролов А. Г. ИК-радиометры нового поколения на основе многоэлементных приемников излучения // Мехатроника, автоматика, управление. – 2007. – № 5. Приложение «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий».

15. НТО «Разработка предложений по оптимизации целевых характеристик бортовой аппаратуры ДЗЗ в ИК-области спектра» (1 этап СЧ НИР «Партитура»-«РКС-ИКР»), ЕИФТ.460000.166Д2, № госрегистрации 4770238802716000092. – М., 2016.

МАЛОГАБАРИТНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЗЗ ИЗ КОСМОСА

А. И. Бакланов

(Филиал АО «РКЦ «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС»)

Аннотация. Описан комплекс оптико-электронной целевой аппаратуры для МКА. Комплекс включает в себя панхроматический и мультиспектральный оптикоэлектронные преобразователи, инфракрасную камеру теплового диапазона на основе микроболометрических матриц, запоминающее устройство и бортовую радиолинию. Аппаратура обеспечила съемку поверхности Земли с высоты 490 км с разрешением 1,5 м в ВД-диапазоне в составе МКА «Аист-2Д». ИК-камера предназначена для отработки новых технологий в области приборостроения для ДЗЗ. Комплекс отличается компактностью и небольшими габаритами.

Ключевые слова: МКА (малый космический annapam), оптико-электронная annapaтура, оптико-электронный преобразователь, запоминающее устройство, бортовая радиолиния, ДЗЗ, высокое разрешение, видимый диапазон, ИК-диапазон, «Аист-2Д».



Рис. 1. Фрагмент панхроматического снимка ОЭА «Аврора» МКА «Аист-2Д»»

28 апреля 2016 г. во время исторического первого запуска с нового Российского космодрома «Восточный» ракеты-носителя «Союз-2А» был выведен на орбиту малый космический аппарат «Аист-2Д». В состав полезной нагрузки спутника входят несколько инструментов для проведения различных научных экспериментов, а также аппаратура дистанционного зондирования Земли «Аврора», созданная в ПАО «КМЗ» и комплекс оптико-электронной целевой аппаратуры (КОЭЦА), разработанный филиалом АО «РКЦ – «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС». 11 мая 2016, т. е. через две недели после старта, начались съемки с использованием оптико-электронной аппаратуры. Информация оперативно передавалась на наземную станцию в АО «РКЦ «Прогресс», где производилась ее распаковка и первичная обработка. После краткосрочного периода настройки аппаратуры было подтверждено высокое качество изображений.

Реальное разрешение на местности составило не хуже 1,8 м (рис. 1), при проекции пикселя в панхроматическом канале 1,5 м и 4,5 м в мультиспектральных каналах. И это при полосе захвата 40 км.

Хорошее качество изображения по всему полю изображения достигнуто благодаря отличным характеристикам широкопольной оптической системы ОЭА «Аврора» (диаметр главного зеркала 360 мм, фокусное расстояние 2000 мм) и оптикоэлектронных преобразователей КОЭЦА.

На рис. 1 и 2 приведены фрагменты панхроматического и цветного комплексированного снимков полученных ОЭА «Аврора» и КОЭЦА в составе МКА «Аист-2Д». На панхроматическом изображении заснят участок взлётно-посадочной полосы аэропорта в Сан-Франциско (США). Уверенно читаются надписи с обозначением полос и разрешаются 16 полос поперек ВПП. Цветной снимок (район Циндао, Китай) получен только на основе данных трех мультиспектральных каналов аппаратуры и демонстрирует хорошую цветопередачу. Использование совместно данных панхроматического и мультиспектральных каналов позволяет получать цветные изображения с пространственным разрешением 1,5 м, т. е. как в панхроматическом канале.



Рис. 2. Фрагмент мультиспектрального снимка ОЭА «Аврора» МКА «Аист-2Д»»

При съемке аппаратурой поверхности Земли сканирование осуществляется в режиме «заметания» («pushbroom») за счет движения космического аппарата по орбите. Аппаратура КОЭЦА спроектирована таким образом, что обеспечивает съемку в диапазоне высот орбиты от 350 до 700 км и при отклонениях МКА по крену до ±30°. Т. е. потенциально она способна обеспечить разрешение до 1метра при понижении орбиты или использовании в комплекте с более длиннофокусной оптической системой. КОЭЦА имеет несколько режимов работы и позволяет осуществлять или одновременно панхроматическую и мультиспектральную съемку, или панхроматическую и инфракрасную съемку, или съемку в каждом спектральном диапазоне отдельно. Аппаратура комплекса проводить цифровую обработку получаемой информации, сжатие её хранение и передачу по скоростной радиолинии (150 Мбит/с) на наземные приёмные пункты. Отличительной особенностью КОЭЦА являются компактность и небольшие весовые характеристики (всего 33 кг).



Рис. 3. Структурная схема КОЭЦА МКА «Аист-2Д»

Малогабаритный комплекс аппаратуры дистанционного зондирования Земли – КОЭЦА, структура которого приведена на рис. 3, включает в себя: панхроматический (ОЭП-АПХ) и мультиспектральный (ОЭП-АМС) оптико-электронные преобразователи, предназначенные для получения совместно с ОЭА «Аврора» снимков поверхности Земли с высоким разрешением в видимом диапазоне спектра; инфракрасную камеру (КОЭ-ИКД) теплового диапазона на основе микроболометрических матриц; запоминающее устройство (БЗУ-А) и бортовые радиопередатчики (ПРД-3) с антеннофидерным устройством (АФУ). Источники вторичного питания (ИП-ОЭП) формируют и фильтруют для оптико-электронных преобразователей все необходимые номиналы напряжения.

Бортовая радиолиния и запоминающее устройство обеспечивают запись, накопление, хранение и передачу на наземную станцию цифровой информации от всех инструментов полезной нагрузки МКА «Аист-2Д», как от аппаратуры, входящей в состав КОЭЦА, так и от научных приборов, установленных на МКА, а также телеметрической информации.

Входящая в состав КОЭЦА инфракрасная камера КОЭ-ИКД предназначена в первую очередь для отработки новых технологий в области приборостроения для ДЗЗ. Камера построена на основе микроболометрических матриц и позволяет получать тепловые изображения поверхности Земли в спектральном диапазоне 8 – 14 мкм с невысоким пространственным разрешением.

Два широкоформатных оптико-электронных преобразователя высокого разрешения (рис. 4) используют в качестве фотоприемников матрицы ПЗС, работающие в режиме ВЗН, разработанные ЗАО НПП «ЭЛАР» (г. С.-Петербург). Масса каждого блока ОЭП около 5 кг, а потребляемая мощность не более 28 Вт при выходном информационном потоке до 756 Мбит/с (или 190 Мпикселей в секунду). Фоточувствительную зону панхроматического (0,5 – 0,8 мкм) блока ОЭП образуют 18 матриц ПЗС ВЗН «Круиз-6». Формат каждого фотоприемника 1536 × 192 пикселя. Размер пикселей 6 × 6 мкм^{2.} Матрицы установлены «в шахматном порядке» с небольшим перекрытием и минимальными зазорами между ними, для обеспечения сплошного изображения. Суммарная длина строки составляет около 27 тысяч пикселей. Динамический диапазон фотоприемных ячеек матриц «Круиз-6» около 2700. Матрицы секционированы и обеспечивают съемку с 192, 128, 96, 64, 48 или 32 шагами накопления. Таким образом достигается дискретное изменение чувствительности ОЭП при изменении условий наблюдения.



Рис. 4. Панхроматический (сверху) и мультиспектральный (снизу) блоки ОЭП

В мультиспектральном блоке ОЭП-АМС используется модификация фотоприемных модулей «Круиз-Ц-Б» со светофильтрами, обеспечивающими съемку в 3-х спектральных диапазонах: 0,45 – 0,52 мкм; 0,53 – 0,6 мкм; 0,63 – 0,69 мкм. В блоке ОЭП-АМС установлено 12 таких фотоприемных модулей форматом 768 × 64 пикселей размером 18 × 18 мкм² и динамическим диапазоном около 5000. Суммарная длина строки около 9 тыс. пикселей. Число шагов накопления изменяется с коэффициентом 2 в диапазоне 64, 32 и 16, позволяя управлять чувствительностью блока ОЭП-АМС.

Фотоприемные модули «Круиз-Ц-Б» представляют собой прецизионную сборку, содержащую фотоприемную матрицу «Круиз-Ц» и трехполосовой интерференционный светофильтр. Светофильтры устанавливаются непосредственно на трехканальной матрице ПЗС ВЗН «Круиз-Ц», таким образом, что падающий на фотоприемные зоны ФПЗС свет сначала проходит через одно из трех спектральных зон микросветофильтра. Схема формирования мультиспекрального (цветного) изображения показана на рис. 5. В результате с каждой фотозоны матрицы ФПЗС будет получено изображение в узком спектральном диапазоне, соответствующем длинам волн пропускаемым одной из зон (полос) светофильтра.

Интерференционные светофильтры являются сложнейшим изделием. От их характеристик зависит формирование качественного цветного изображения. Светофильтры изготовлены в АО «ИЗОВАК» (Республика Беларусь). Точность точность границ спектральных зон около 3 нм. Коэффициент пропускания в спектральных зонах более 90 %. На всей площади микрофильтра обеспечена высокая равномерность.



Рис. 5. Схема получения мультиспектральных изображений

В блоках ОЭП аналоговый сигнал от каждой ПЗС-матрицы сначала усиливается, а затем преобразуется в цифровую форму (10 бит), подвергается сжатию методом ДИКМ до 4 бит на выборку, сопровождается БШВ, служебной информацией, упаковывается и передается на выход блоков.

Передача видеоинформации от блоков ОЭП и КОЭ-ИКД в БЗУ осуществляется с использованием волоконно-оптических линий связи. Применение волоконно-оптических линий передачи улучшило эксплуатационные характеристики системы передачи информации. В 8 – 10 раз уменьшилась масса бортовой кабельной сети. Повысилась помехоустойчивость линий связи к воздействию электромагнитных помех. Увеличилась скорость передачи и приема информации по сравнению с применением электрических интерфейсов. Существенно снизилось количество линий. Эти каналы высокоскоростной передачи информации между блоками в комплексе аппаратуры КОЭЦА являются настоящим инновационным решением для использования в составе малого космического аппарата «Аист-2Д». При этом все компоненты для таких линий (кабельная оптическая сеть, оптические передатчики и приёмники, кроссы) разработаны и изготовлены на своей производственной базе в НПП «ОПТЭКС».

При проведении разработки целевой аппаратуры МКА «Аист-2Д» была поставлена задача экспериментальным путем на борту МКА провести исследования возможности использования в дистанционном зондировании Земли микроболометрических матриц, работающих в тепловом диапазоне. Для проведения этих исследований и испытаний как в наземных, так и в натуральных условиях создана инфракрасная камера КОЭ-ИКД на основе микроболометрического модуля разработки ЗАО НПП «ЭЛАР». Камера обеспечивает получение информации о Земной поверхности в тепловом ИК-диапазоне от 8 до 14 мкм при съемке в диапазоне высот от 350 до 700 км.

КОЭ-ИКД представляет собой моноблок массой 4,4 кг, состоящий из: платы управления; платы сопряжения интерфейсов; модуля питания; платы питания; платы оптических передатчиков; микроболометрического ИК модуля и ИК-объектива. Камера имеет кадровую организацию. Формат кадра 384 × 288 пикселей размером 25 мкм. Частота считывания кадров 50 Гц. При этом с высоты 490 км пространственное разрешение (GSD) составляет 122 метра, а полоса захвата 47 км.

На рис. 6 показан одновременный снимок вулкана Плоский Толбачик на Камчатке в панхроматическом (слева) и тепловом ИК-диапазоне 8 – 14 мкм (в центре и справа). Хорошо выделяются тепловые поля «Большого трещинного извержения», снежный покров и ледники в кратерах вулканов.

Данные полученные в ходе продолжающейся более года эксплуатации КОЭ-ИКД на борту МКА «Аист-2Д» продемонстрировали и подтвердили возможность использования микроболометрических матриц в бортовой аппаратуре в условиях космического полёта. Снимки в тепловом диапазоне имеют хорошее температурное разреше-

ние $0,2^{\circ}C - 0,4^{\circ}C$ в одиночных кадрах и до $0,05^{\circ}C$ после суммирования информации от одних и тех же мест поверхности из нескольких (до 100) кадров. При этом создана и отработана специальная технология и наземное программное обеспечение так называемого «цифрового B3H».



Рис. 6. Вулканы на Камчатке. Слева снимок в ВД-диапазоне. В центре и справа ИК 8 – 14 мкм

Управление КОЭЦА осуществляется бортовой системой контроля и управления (БСКУ) КА по интерфейсу CAN2.0, путем выдачи команд непосредственного исполнения. Управление КОЭЦА производится по программно-временному принципу. Массивы управляющих сигналов содержат все необходимые исходные данные для работы КОЭЦА. Синхронизация вторичных шкал времени с бортовой шкалой времени (БШВ), осуществляется по магистрали меток времени – синхросигналов частотой 1 Гц. Подачу питающего напряжения на основной или резервный блоки питания соответствующих составных частей КОЭЦА осуществляет БСКУ. Туда же от КОЭЦА поступает информация оперативного контроля и телеметрия.

Бортовое запоминающее устройство (БЗУ-А) предназначено для приёма, записи, хранения и воспроизведения целевой видеоинформации, поступающей от оптикоэлектронных преобразователей ОЭП-АПХ, ОЭП-АМС, а также камеры КОЭ-ИКД по оптоволоконным линиям связи. Кроме того, БЗУ-А обеспечивает те же самые функции и для научной, а также специальной телеметрической информации, которая поступает в блок по интерфейсному каналу САN. Эти данные передаются в виде пакетов и включают в себя идентификаторы источника, метки времени и другую необходимую служебную информацию.

Информация хранится в энергетически независимой флеш-памяти. Емкость БЗУ-А на начало срока активного существования 160 ГБ. На конец срока прогнозируется около 140 ГБ. В процессе испытаний подтверждена скорость записи информации от 0,04 до 1,92 Гб/с., что обеспечивает все сочетания работы аппаратуры. Воспроизведение информации из БЗУ в радиолинию осуществляется со скоростью до 150 Мбит/с. Данные передаются в аппаратуру бортовой радиолинии по линиям LVDC. Конструктивно БЗУ-А выполнено в виде моноблока Масса блока 5,7 кг. Максимальная потребляемая мощность в процессе записи 16,2 Вт.

Бортовая радиолиния передачи целевой информации (БА РЛЦИ), входящая в состав КОЭЦА, разработана и изготовлена ЗАО НПП «САИТ». Модуляция QPSK. Скорость передачи данных 150 Мбит/с через всенаправленную антенну. БА РЛЦИ осуществляет передачу цифровой информации на наземный приемный пункт в зоне обслуживания ±700 км. В состав БА РЛЦИ входят два радиопередающих устройства ПРД-3 (основное и резервное) и антенно-фидерное устройство. Блок передатчика ПРД-3 осуществляет прием данных от БЗУ-А, помехоустойчивое кодирование, форматирование последовательного выходного потока данных, форматирование синфазного и квадратурного каналов, цифровую фильтрацию, цифроаналоговое преобразование, генерацию сигнала несущей частоты, модуляцию несущей и усиление ВЧсигнала. Мощность передатчика 8 Вт. Потребляемая мощность 70 Вт. Масса ПРДЗ -1,6 кг. Антенно-фидерное устройства (АФУ) работает в Х-диапазоне. Антенна ненаправленная. Зона обслуживания ±70°. Коэффициент усиления в зоне 0,45 – 7,2. Прием информации ОЭА «Аврора» и КОЭ-ИКД от МКА «Аист-2Д» осуществляется на ШПОИ «Самара». Технические и программные средства для и первичной обработки информации ДЗЗ МКА «Аист-2Д» разработаны специалистами НПП «ОПТЭКС». В случае необходимости, параллельный или автономный приём информации может осуществляться на наземной станции, развёрнутой в Зеленограде в филиале АО «РКЦ «Прогресс» – НПП. Уже более года ведется постоянная штатная работа с МКА и съёмочной аппаратурой. Подтверждены все заложенные конструктивные решения и проектные характеристики оптико-электронной аппаратуры. Информации ОЭА «Аврора» и КОЭЦА востребованы потребителями.

К ПОСТРОЕНИЮ РАДИОИНТЕРФЕЙСА СПУТНИКОВОГО ВЫСОТОМЕРА

Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур

(АО «Российский институт радионавигации и времени»)

Аннотация. Обсуждаются принципиальные основы организации радиоинтерфейса высотомера, предназначенного для работы в составе комплексов дистанционного зондирования Земли из космоса. Рассматриваются факторы, влияющие на выбор несушей частоты зондирующего сигнала. Описывается аналитическая модель усредненного профиля принимаемой мошности. Приводятся результаты синтеза максимально правдоподобного измерителя запаздывания отраженного сигнала высотомера и выражение для асимптотической дисперсии оценки этого параметра. Даются выражения для шумовых дисперсий совместных оценок высоты космического носителя над облучаемой морской поверхностью, значимой высоты волны и отношения интенсивностей сигнала и шума. Предлагается алгоритм поиска отраженного сигнала и оцениваются его характеристики. Синтезируются оптимальный временной дискриминатор следящего контура измерения запаздывания и удобные в реализации его квазиоптимальные заменители. Констатируются результаты верификации теоретических построений с помощью компьютерной модели в среде МАТЛАБ. В итоговом резюме кратко сопоставляются варианты выбора зондирующего сигнала на основе частотной и бинарной фазовой модуляции.

Ключевые слова: спутниковый высотомер, эхо-сигнал, профиль мощности, оценки по максимуму правдоподобия, временной дискриминатор, формат модуляции.

Введение

Спутниковый радиовысотомер (альтиметр) – важная часть современных комплексов дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса. В основе работы подобных приборов лежит традиционный принцип импульсной радиолокации, состоящий в извлечении информации о расстоянии до подстилающей поверхности из запаздывания отраженного импульса относительно излучаемого. Также по характеристикам принимаемого эхо-сигнала высотомер может определить степень взволнованности исследуемой акватории и ряд других параметров. Перечень приложений спутниковой альтиметрии весьма обширен и разнообразен: данные, полученные в результате измерений, чрезвычайно важны для решения геофизических, океанографических, экологических и ряда других задач [1, 2]. Отметим, что для указанных применений погрешность оценки высоты должна лежать в пределах единиц сантиметров.

Альтиметр засвечивает поверхность Земли с высоты порядка тысячи километров. Даже при достаточно остром луче антенны, характерном для спутникового высотомера, диаметр освещаемого пятна может доходить до десятка и более километров, так что принятый сигнал как суперпозиция отражений от многих элементарных блестящих точек оказывается протяженной во времени реализацией гауссовского случайного процесса. В связи с этим космические высотомеры современных космических миссий относятся к классу импульсно-ограниченных (*pulse-limited*), для которых крутизна нарастающего фронта эхо-сигнала определяется не размером облучаемой зоны, как это имело бы место в антенно-ограниченном (*beam-limited*) высотомере, а длительностью сжатого зондирующего импульса [3].

В настоящей статье речь пойдет об океанографическом импульсно-ограниченном высотомере.

Выбор частотного диапазона

Для достижения упомянутых выше точностных показателей ширина спектра зондирующего импульса высотомера должна иметь порядок сотен мегагерц. Если добавить к этому требование малых габаритов остронаправленной антенны, становится понятной общепризнанная предпочтительность выбора несущей спутникового альтиметра в сантиметром или субсантиметровом диапазоне волн. Таблица распределения частот Регламента ITU [4], оставляет в качестве полноценных кандидатов для рассматриваемых приложений лишь диапазоны C (5,25–5,57 ГГц), X (9,3–9,8 ГГц), Ku (13,25–13,75 ГГц) и Ka (35,5–36 ГГц). Остальные из отведенных Регламентом частотных окон либо разрешены к использованию в космическом зондировании только на вторичной основе, либо относятся к диапазону миллиметровых волн, непригодных из-за критического поглощения в атмосфере.

Дальнейший выбор основывается на компромиссе между атмосферными потерями и ионосферной рефракцией. Что касается первого из названных факторов, то наибольшее ослабление вносят гидрометеоры, причем ослабление увеличивается с ростом частоты: если в С-диапазоне потери во всем дождевом столбе высотой порядка 5 км не превышают долей децибела, то в диапазоне Ка они могут превзойти 10 дБ. С другой стороны, серьезной проблемой является нейтрализация ионосферной задержки сигнала. Известно, что ионосферный набег запаздывания обратно пропорционален квадрату несущей частоты. Это позволяет практически полностью исключить ионосферную погрешность за счет измерения задержки на двух частотах. Недостатки данного метода кроются в значительном усложнении архитектуры альтиметра и росте шумовой ошибки, которую, впрочем, можно минимизировать разумным выбором пары частот (Ku/C высотомер). В качестве альтернативы двухчастотному построению может рассматриваться одночастотный вариант с повышенной несущей f_0 , принадлежащей Ка-диапазону. Именно это решение ($f_0 = 35,75$) положено в основу наиболее продвинутого спутникового высотомера AltiKa [2, 5] и рассматривается как базовое в последующем контексте.

Модель принимаемого эхо-сигнала

В прогнозировании характеристик спутникового альтиметра важнейшая роль принадлежит аналитическому выражению профиля мощности, т. е. временной зависимости усредненной по многим зондированиям принятой мощности. Среди известных из литературы наиболее популярна модель Брауна [6], предложенная в 1977 г. Применительно к задачам высотометрии над морем ее общий замысел был изложен в работе Мура и Вильямса [7], Браун же довел результаты до компактной и удобной в употреблении формы.

Заметим, что последующие уточнения модели Брауна (например, [8]) в основном имели целью максимальный учет смещений, обусловленных асимметрией гребней и впадин морских волн, асимметрией распределения наклонов морской поверхности и другими факторами. Подчеркнем, что влияние подобных эффектов ограничивается этапом финальных измерений, выполняемых наземным мониторинговым комплексом по данным альтиметра, транслируемым с борта космического аппарата. Главной же целью измерений, осуществляемых на борту, является надежное удержание принимаемого эхо-сигнала на автосопровождении, малочувствительном к указанным выше систематическим ошибкам. Поэтому в плане разработки самого спутникового альтиметра актуальна такая модель эхо-сигнала, аналитическая компактность которой, достигаемая за счет пренебрежения упомянутыми вторичными факторами, позволяет синтезировать прозрачные алгоритмы поиска и сопровождения эхо-сигнала и с достаточной точностью оценить их эффективность.

Традиционно облучаемая поверхность представляется как множество элементарных отражателей, вносящих в профиль свой парциальный сигнал со случайной равномерно распределенной на отрезке $[0,2\pi]$ фазой, статистически независимой от фаз остальных слагаемых результирующей суперпозиции. При этом средняя по ансамблю мощность последней $P_r(t)$ как функция времени получается суммированием средних парциальных мощностей, т.е. интегрированием по засвечиваемой площади:

$$P_{r}(t) = A \int_{0}^{\pi \infty} \int_{0}^{s^{2} \left(t + 2\frac{h - r}{c}\right)} [1 + (\rho / h)^{2}]^{2} G^{2}(\theta) \rho d\rho d\phi, \qquad (1)$$

где S(t) – форма сжатого зондирующего импульса единичной амплитуды; h – высота фазового центра антенны альтиметра над зондируемой поверхностью; $r = \sqrt{h^2 + \rho^2}$ – наклонная дальность от антенны до блестящей точки с полярными координатами ρ и ϕ ; c – скорость света; $G(\theta)$ – нормированная диаграмма направленности антенны (ДНА), полагаемая телом вращения; θ = arccos[($h \cos \xi + \rho \sin \xi \cos \phi$) / r] – угол между направлением на блестящую точку и лучом антенны; ξ – угол между осью ДНА и линией надира (см. [6]). Сомножитель A объединяет все не зависящие от координат элементарного отражателя величины, в том числе удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) σ_0 , и определяется из уравнения радиолокации.

Равенство (1) описывает среднюю мощность эхо-сигнала высотомера, отраженного от плоской поверхности, например, спокойного моря. Учет волнения реализуется сверткой (1) с плотностью вероятности возвышения водной поверхности W(.), обычно полагаемой гауссовской [1 – 3, 6] со стандартным отклонением, примерно равным четверти значимой высоты волны H_w . При достаточно остром луче антенны названную свертку $P_{rw}(t)$ можно получить, свернув предварительно $s^2(t)$ с приведенной плотностью вероятности (c/2)W(cx/2) и подставив результат в (1) вместо $s^2(t)$.

Для колокольного зондирующего импульса $s(t) = \exp(-\beta t^2)$, где $\beta = 2 \ln 2 / \Delta_{0,5}^2$, $\Delta_{0,5}$ – длительность импульса по уровню половинной мощности,

его свертка $S_W^2(t)$ с гауссовской плотностью вероятности (c/2)W(cx/2) есть вновь колокольная функция: $S_W^2(t) = \sqrt{vs^2}(\sqrt{vt})$, где $v = 1/[1+16\beta(\sigma_z/c)^2]$. Наличие волнения фактически растягивает гауссовский импульс во времени, сохраняя при этом его энергию. Тем самым альтиметр обретает возможность измерять наряду с текущей высотой степень взволнованности моря путем оценки параметра масштабирования V.

В итоге выражение для профиля мощности эхо-сигнала, справедливое даже при отклонениях ξ луча антенны от вертикали на треть его ширины по уровню 0,5 $\theta_{0.5}$ и более, примет вид

$$P_{rw}(t) \approx \frac{A\pi\sqrt{\pi}ch}{2\sqrt{2\beta}} \exp\left(-\frac{4\xi^2}{\gamma}\right) \left\{ 2\Phi\left[2\sqrt{\beta\nu}\left(t-\frac{\alpha\eta}{4\beta\nu}\right)\right] \exp\left[-\alpha\eta\left(t-\frac{\alpha\eta}{8\beta\nu}\right)\right] - (2)\right\} - \Phi\left[2\sqrt{\beta\nu}\left(t-\frac{\alpha}{4\beta\nu}\right)\right] \exp\left[-\alpha\left(t-\frac{\alpha}{8\beta\nu}\right)\right] \right\},$$

где $\gamma = (2 / \ln 2) \sin^2(\theta_{0.5} / 2)$ – показатель остроты гауссовского приближения ДНА $G(\theta) = \exp[-(2 / \gamma) \sin^2 \theta]$ из [6]; $\Phi(\cdot)$ – интеграл вероятности; $\alpha = 4c / (\gamma h)$, а $\eta = 1 - 2\xi^2 / \gamma$.

Таким образом, предложенная математическая модель выражает профиль принятой альтиметром мощности через стандартные функции. Благодаря этому упрощаются и обретают прозрачность как синтез алгоритмов поиска и сопровождения эхосигнала, так и анализ потенциальной точности совместной оценки альтиметром высоты орбиты, значимой высоты волны, удельной эффективной отражающей поверхности и отклонения оси ДНА от линии надира.



Компьютерная модель эхо-сигнала высотомера

Рис. 1. Профили мощности для различных типов зондирующего сигнала

Для дополнительной проверки полученных результатов была разработана имитационная модель эхо-сигнала высотомера в среде МАТЛАБ. Профили мощности для различных типов излучаемого сигнала (с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), фазоманипулированный (ФМ) импульс), полученные в результате исполнения программного кода, показаны на рис. 1.

Разработанная программная модель обладает высокой степенью адекватности физически прогнозируемым характеристикам отраженного сигнала и вполне пригодна для применения в компьютерных экспериментах по исследованию основных режимов функционирования высотомера.

Оптимальная оценка запаздывания эхо-сигнала

Как уже было сказано, принимаемый полезный сигнал как суперпозиция многих случайно интерферирующих компонент является отрезком нормального случайного процесса, наблюдаемого на фоне сопутствующих аддитивных шумов. Учитывая данное обстоятельство, было получено выражение для логарифма функции правдоподобия $z(\tau)$ относительно оцениваемого запаздывания отраженного сигнала τ [9]:

$$z(\tau) = \frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{q(k\delta - \tau)y_i^2(k\delta)}{1 + q(k\delta - \tau)} - N \sum_{k=0}^{n-1} \ln[1 + q(k\delta - \tau)]$$

где σ_n^2 – дисперсия теплового шума; N – число накапливаемых зондирований; n – число независимых отсчетов в пределах принятого профиля мощности; $y_i(t)$ – огибающая наблюдения на *i*-м зондировании; $q(t) = P_r(t) / \sigma_n^2$ – текущее отношение сигнал-шум по мощности; $\delta = 1/W$ – интервал дискретизации Найквиста, W – ширина спектра излучаемого сигнала.

Тем самым структуру максимально правдоподобного измерителя запаздывания можно представить в виде банка из *M* параллельных каналов с принятием решения по наибольшему из их откликов:

$$\hat{\tau} = \arg \max_{m} z(\tau_{m}),$$

где τ_m – значение параметра τ , на которое настроен *m*-й канал, m = 1, 2, ..., M.

Обращение к границе Крамера-Рао [10], позволяет найти асимптотическую (соответствующую высокой точности измерений) условную (при истинном значении запаздывания τ_0) дисперсию оценки $\hat{\tau}$ (см. [9]):

$$\operatorname{var}\left\{\hat{\tau}\big|\tau_{0}\right\} \approx \frac{1}{NW \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{q'(t)}{1+q(t)}\right]^{2} dt}, N \gg 1,$$
(3)

где оговорка относительно *N* отражает асимптотическую сходимость дисперсии оценки запаздывания к границе Крамера – Рао. Соответственно условное средне-квадратическое отклонение (СКО) оценки высоты от истинного значения

$$\sigma_h = c \sqrt{\operatorname{var}\left\{\hat{\tau} \middle| \tau_0\right\}} / 2$$

Отметим, что достоверность теоретического анализа была подтверждена компьютерным экспериментом, в ходе которого нарастающий фронт мощности эхо-сигнала аппроксимировался интегралом вероятности. Установлено также, что популярная оценка времени прихода отраженного сигнала по пересечению предустановленного порога весьма ощутимо (до нескольких раз) проигрывает в точности оптимальной [9].

Потенциальная точность совместной оценки нескольких параметров

Информационными параметрами, традиционно измеряемыми спутниковым альтиметром, являются текущая высота h космического аппарата над зондируемой поверхностью, значимая высота морской волны H_w , а также УЭПР σ_0 в освещаемом пятне. К этому перечню можно добавить и угол отклонения ξ оси антенны от вертикали, оценка которого позволяет скорректировать систематические ошибки измерения названных информационных параметров, обусловленные неточной юстировкой антенны. Имея в виду, что, в отличие от других параметров, информация об отклонении луча антенны от вертикали сосредоточена главным образом в скорости убывания профиля, задача оценки этой величины может рассматриваться изолированно. Поэтому внимание в докладе сфокусировано на трехпараметрической измерительной задаче.

Перепишем соотношение для профиля мощности эхо-сигнала (2) при точном нацеливании антенны высотомера на надир в удобной форме:

$$P_{rw}(t;\tau,\nu,P_r,\xi=0) \approx P_r \Phi \left[2\sqrt{\beta\nu} \left(t - \tau - \frac{\alpha}{4\beta\nu} \right) \right] \exp \left[-\alpha \left(t - \tau - \frac{\alpha}{8\beta\nu} \right) \right] =, \quad (4)$$
$$= P_r \varphi(t;\tau,\nu)$$

где $P_r = A\pi \sqrt{\pi} c h / (2\sqrt{2\beta})$ – множитель, связанный с УЭПР σ_0 .

«Подлинный» зондирующий сигнал в аналитических построениях можно практически без потери точности заменить колокольным [1, 2, 6]. В результате обращения матрицы Фишера [10] третьего порядка найдены зависимости потенциальных СКО σ_h , σ_H и σ_Q одновременной оценки трех измеряемых параметров соответственно h, H_w и $Q = P_r / \sigma_n^2$ – отношения интенсивностей сигнала и шума, от ширины спектра зондирующего сигнала и энергетики радиолинии. В качестве примера результаты вычислений для N = 1000 и двух значений H_w сведены в таблице, где γ_i – отношение СКО при совместных и раздельных измерениях *i*-й величины. При этом за исходные приняты следующие цифры: h = 1000 км; излучаемая пиковая

мощность $P_t = 10$ Вт; длительность зондирующего сигнала T = 100 мкс; шумовая температура приемника $T_e = 725$ ° К; частота несущей $f_0 = 35,75$ ГГц; диаметр зеркальной антенны 1 м; дополнительные трассовые потери $L_{p,dB} = 10$ дБ.

Таблица

Параметр		$H_w = 4$ M		<i>H</i> _{<i>w</i>} = 16 м			
W, МГц	100	300	500	100	300	500	
Q, дБ	20,55	15,78	13,56	20,55	15,78	13,56	
σ_h , см	3,168	1,940	1,598	4,658	3,061	2,596	
σ_H , см	9,411	6,077	5,427	13,718	10,552	9,670	
σ_Q	0,749	0,167	0,085	0,739	0,160	0,081	
Υh	1,866	1,637	1,518	1,492	1,310	1,231	
γ_H	1,892	1,653	1,529	1,568	1,355	1,259	
ŶQ	1,047	1,023	1,016	1,110	1,057	1,034	

Показатели точности оценок параметров, $\sigma_0 = 8$ дБ

Как видно из таблицы, с расширением полосы сигнала потенциальная точность оценки параметров возрастает. Увеличение степени взволнованности моря приводит к снижению точности измерения как высоты космического носителя, так и высоты волн. Совместные оценки умеренно коррелированы, так что их дисперсии ненамного больше таковых при раздельном измерении.

Поиск эхо-сигнала

Принятый в качестве базового алгоритм поиска отраженного сигнала по времени предполагает использование банка параллельных каналов, сдвинутых друг относительно друга на длительность профиля по половинному уровню. Поскольку целью поиска является грубая фиксация запаздывания переднего фронта профиля, итогом процедуры является время прихода, на которое настроен первый слева канал, в котором накопленная статистика превысила предустановленный порог. Последний оптимизируется по минимуму временных затрат при заданной надежности поиска. Как было показано, малые вероятности ошибочного завершения поиска ($10^{-5} - 10^{-3}$) при приемлемых аппаратных затратах (числе каналов, близком к сотне) и частоте зондирований порядка нескольких килогерц достигаются при продолжительности поиска в пределах десятков-сотен миллисекунд. Верификация теоретических оценок с помощью компьютерного эксперимента продемонстрировала их высокую достоверность.

Синтез временного дискриминатора бортовой следящей системы

Основная роль системы слежения за запаздыванием в бортовом приемнике спутникового высотомера состоит в надежном удержании начального сегмента эхосигнала в пределах следящего окна. Ключевым элементом данной системы служит дискриминатор, преобразующий временное рассогласование между принятым сигналом и местным следящим окном в сигнал ошибки, управляющий задержкой упомянутого окна. Далее измеренные отклонения временного положения принятого сигнала от середины (или иной наперед заданной точки) окна совместно с полученными отсчетами усредненного эхо-сигнала могут быть переданы на Землю для финального извлечения необходимой информации.

1. Оптимальный дискриминатор (optimal). Следящий измеритель реализует построение оценки $\hat{\tau}$ максимального правдоподобия запаздывания сигнала τ , решая уравнение правдоподобия $dz(\tau)/d\tau|_{\tau=\hat{\tau}} = 0$ рекуррентно. Сигнал ошибки такого дискриминатора имеет вид

$$e(\tau) = W \int_{0}^{T} \frac{Q\varphi'(t-\tau)}{[1+Q\varphi(t-\tau)]^2} \left[1 + Q\varphi(t-\tau) - \frac{y^2(t)}{2\sigma_n^2} \right] dt,$$

где $\varphi(t) = \varphi(t; \tau = 0, \nu = 1)$ (см. (4)). Шумовая ошибка петли слежения за задержкой характеризуется дисперсией σ_{τ}^2 приведенных ко входу дискриминатора виртуальных флюктуаций запаздывания принимаемого сигнала [10]. В силу оптимальности реализуемой процедуры дисперсия σ_{τ}^2 совпадает с (3).

Описанная структура дискриминатора, обеспечивая потенциальную точность измерения времени, весьма некомфортна в отношении реализационных затрат, если речь идет о бортовом приемнике альтиметра. Далее обратимся к возможным квазиоптимальным решениям.

2. Дискриминатор слежения за максимумом профиля мощности (max-point). Местной опорой r(t) в подобном дискриминаторе может служить функция $\varphi'(t)$, т. е. $r(t) = \varphi'(t)$. Сигнал ошибки тогда примет форму

$$e(\tau) = \int_{0}^{T} y^{2}(t) \varphi'(t-\tau) dt$$

3. Дискриминатор слежения за точкой максимальной крутизны профиля (maxsteep-point). В точке максимальной крутизны нарастающего фронта вторая производная меняет знак с положительного на отрицательный, что можно использовать для дискриминирования временного положения приходящего сигнала. Дискретно аппроксимируя вторую производную наблюдения $y^2(t)$, возьмем три последовательных отсчета $y^2(t)$, отделенных друг от друга по времени промежутком $\delta = 1/W$, и сформируем сигнал ошибки как

$$e(\varepsilon) = y^{2}(\varepsilon - \delta) + y^{2}(\varepsilon + \delta) - 2y^{2}(\varepsilon),$$

где **є** — временное рассогласование между принятым сигналом и местной опорой, представляющей собой попросту тройку селектирующих импульсов.

4. Дискриминатор слежения за точкой половинной мощности (half-power). Сигнал ошибки в подобном дискриминаторе пропорционален временному рассогласованию между центром (или иной фиксированной точкой) следящего окна и моментом пересечения принимаемым наблюдением уровня половинной мгновенной мощности.

На рис. приведены зависимости дисперсий σ_{τ}^2 от параметра Q в пересчете на одно зондирование для четырех рассмотренных дискриминаторов при W = 320 МГц.

Как видно из рис. 2, дискриминатор точки половинной мощности по точности измерения запаздывания равноценен двум другим квазиоптимальным структурам. В то же время он максимально прост, и может быть обоснованно предпочтен остальным.



Рис. 2. Дисперсии эквивалентных флюктуаций запаздывания

Выбор модуляционного формата зондирующего сигнала

Накопленный опыт построения спутниковых альтиметров свидетельствует, что достижение требуемых точностных показателей в рамках жестких лимитов на пиковую мощность (5 – 10 Вт) возможно лишь с применением широкополосных сигналов, имеющих частотно-временное произведение порядка десятков тысяч [1, 2]. При подобном порядке частотно-временного произведения WT любые модуляционные форматы в принципиальном отношении примерно равноценны, так что предпочтение, отданное линейной частотной модуляции относительно фазовой, характерное для спутниковых высотомеров всех состоявшихся миссий, обусловлено исключительно соображениями технологического характера. С другой стороны, возможности современной элементной базы делают вполне реальным создание малогабаритных бортовых цифровых процессоров, работающих на скоростях в сотни миллионов операций в секунду. Цифровая идеология приемника высотомера, в свою очередь, хорошо согласуется с дискретными форматами модуляции, обеспечивая фазоманипулированным сигналам, свободным от таких недостатков как чувствительность к уходам

и дрейфам, жесткие требования к линейности закона модуляции и пр., конкурентоспособность в плане применений в новых поколениях спутниковых высотомеров.

Заключение

В предлагаемой статье конспективно изложены результаты исследований авторов, посвященных теоретическим подходам к построению радиоинтерфейса спутникового высотомера. В ходе реализации проекта основные усилия фокусировались на выборе рабочего диапазона частот, построении аналитической и компьютерной моделей профиля принятой мощности, синтезе оптимальных алгоритмов оценки высоты космического носителя, значимой высоты волны и УЭПР зондируемой поверхности, расчете потенциальной точности измерения названных параметров, разработке алгоритмов поиска и автосопровождения эхо-сигнала высотомера. Анализ современного состояния цифровой схемотехнической базы позволил сделать вывод о потенциальной конкурентоспособности ФМ зондирующих сигналов относительно повсеместно применяемых в современной альтиметрии сигналов с ЛЧМ.

Литература

1. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications. Ed. by L.-L. Fu, A. Cazenave. – San Diego: Academic Press, 2001. – 463 p.

2. Coastal Altimetry. Ed. by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. – Berlin: Springer, 2011. – 565 p.

3. Chelton D. B., Walsh E. J., MacArthur J. L. Pulse Compression and Sea Level Tracking in Satellite Altimetry // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 1989. – V. 6. – P. 407–438.

4. Регламент радиосвязи. – 2012.

5. AltiKa: a Ka-band Altimetry Payload and System for Operational Altimetry during the GMES Period / P. Vincent, N. Steunou, E. Caubet, L. Phalippou, L. Rey, E. Thouvenot, J. Verron // Sensors. – 2006. – V. 6. – P. 208 – 234.

6. Brown G. S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications // IEEE Trans. on Ant. and Prop. -1977. -V. AP-25, no. 1. -P. 67 - 74.

7. Moore R. K., Williams C. S. Radar Terrain Return at Near-vertical Incidence // Proc. IRE. – 1957. – V. 45. – No. 2. – P. 228 – 238.

8. Hayne G. S. Radar Altimeter Mean Return Waveforms from Near-Normal-Incidence Ocean Surface Scattering // IEEE Trans. on Ant. and Prop. – 1980. – V. AP-28. – No. 5. – P. 687–692.

9. Потенциальная точность измерения запаздывания отраженного сигнала космическим альтиметром / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2017. – № 2. – С. 5 – 11.

10. Радиотехнические системы: Учебник для вузов / Под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Высшая школа, 1990 – 496 с.

О ПОЛУЧЕНИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПО ТЕХНОЛОГИИ РСА

А. Е. Евграфов, В. Г. Поль

(АО «Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина»)

Аннотация: Рассматриваются принципы наблюдения поверхности земли по технологии радиолокации с синтезом апертуры. Двумерное наблюдение трактуется как двукратный обзор по дальности в двух существенно различных масштабах времени. Показывается методика формирования изображения объекта в системе наблюдаемых координат с высоким разрешением.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиолокация с синтезированной апертурой антенны, радиолокация бокового обзора.

Введение

Технология РСА использует так называемые сложные (широкополосные) сигналы и позволяет получать радиолокационные изображения (РЛИ) участков поверхности Земли с высоким разрешением по двум линейным координатам [1, 2]. Первая координата направлена по перпендикуляру к текущей траектории полета КА и по традиции носит название наклонная дальность. Вторая координата направлена по касательной к этой же траектории, и также по традиции называется азимутом. В радиолокации обзор по дальности с применением зондирующих сложных сигналов и их корреляционной обработкой известен давно. Обзор же по азимуту в технологии РСА, по существу, является тоже обзором по дальности и также использует корреляционную обработку принимаемых сложных сигналов. Однако высокое разрешение по азимуту поддерживается вторичной глубокой фазовой модуляцией сигналов, дополняющей модуляцию сигналов, излученных передатчиком. Эта дополнительная модуляция возникает при отражении зондирующих сигналов от поверхности Земли, и принимаемых РЛС, движущейся относительно нее, достаточно продолжительное время. При этих условиях длительный сигнал, принятый как единое целое, также оказывается сложным, и его корреляционный прием позволяет получить полное двумерное РЛИ протяженного объекта.

Таким образом, РЛИ в технологии РСА и его качественные показатели (прежде всего по координате азимута) формируются конкретным характером относительного движения РЛС и цели. Показано [3], что с повышением желаемого разрешения РЛИ требования к точному описанию геометрии движения РСА и цели растут квадратично, и быстро становятся критичными. В результате сегодня технология РСА выходит за рамки чистой радиолокации, требует тесного взаимодействия с механикой полета носителя РЛС и становится междисциплинарной. Однако в специальной литературе необходимость учета этого обстоятельства, сильно влияющего на потенциальные возможности мониторинга, недооценена. Как следствие, в литературе по качественному мониторингу указанная специфика систем наблюдения обсуждается редко. В связи с этим, ниже предлагается краткий обзор и анализ потенциальных возможностей технологии РСА, основанный на принципах классической теории оптимального приема и объединенный с элементами механики полета носителей РЛС [4].

Классическая схема синтеза радиолокационного изображения по технологии РСА

Классическая схема съемки по технологии РСА известна (рис. 1). В этой схеме траектория полета носителя РЛС и наблюдаемый объект (отмечено зеленым) описываются в местной системе прямоугольных координат *XYZ*. Предполагается, что полет носителя РЛС производится на постоянной высоте H_0 и с постоянной скоростью v_0 по оси *Y*. В системе координат *XYZ* плоскость *XZ* (называемая траверсной) дополняется осью наклонной дальности *X'*, лежащей в траверсной плоскости и направленной под углом β к оси *Z*. По этой оси РЛС посылает периодический сложный сигнал и находит наклонную дальность R_0 до парциального элемента разрешения (ПЭР) РЛИ объекта наблюдения (отмечено красным).



Рис. 1. Классическая схема синтеза радиолокационного изображения

Обзор протяженного объекта по координате дальность

Рассмотрим обзор протяженного объекта по координате дальность, ограничиваясь одним периодом повторения зондирующего сигнала, и выделим малый интервал в окрестности некоторого текущего момента времени, равный длительности зондирующего сигнала. Пусть РЛС, находясь, над началом координат в текущий момент времени $t = T_0$, облучает под углом β участок Земли, ограниченный длительностью сигнала и следом диаграммы направленности антенны (ДНА) (отмечено синим). Этот участок является текущей строкой обзора координаты дальность, а его центр находится в точке пересечения осей горизонтальной X и наклонной X' дальностей.

Строка дальности в технологии РСА служит протяженной целью, которая представлена множеством случайно и произвольно расположенных отражающих площадок (точек) малых размеров. Эти точки отражают элементарные сигналы, каждый из которых является масштабными комплексными репликами зондирующего сигнала. В результате все принятые элементарные радиосигналы составляют в сумме узкополосный случайный процесс (УСП) с несущей [4]. Он описывается текущей автокорреляционной функцией (АКФ), копирующей АКФ элементарного сигнала. При этом комплексная амплитуда несущей УСП является случайной и медленно флуктуирующей во времени с характерным масштабом длительности АКФ УСП по его аргументу [5].

Взаимокорреляция сигнала, отраженного от строки дальности с зондирующим сигналом (их свертка) дает сжатый сигнал, являющийся АКФ того УСП, который порожден рассматриваемой строкой дальности. Комплексная амплитуда несущей

сжатого сигнала описывает ПЭР объекта по координате дальность. Она интерпретируется как сечение РЛИ этого ПЭР по указанной координате.

В ходе обзора по координате дальность, после свертки всех принятых сигналов с зондирующим, формируется последовательность выходных сжатых сигналов, представляющих РЛИ всех ПЭР объекта, лежащих на оси *X*. Эта последовательность, при дискретизации УСП по аргументу время, может приближенно рассматриваться как последовательность радиоимпульсов с постоянной несущей частотой, но имеющих случайные и статистически независимые амплитуды и фазы. Т. е., эта последовательность постоь представляет собой множество ортогональных сигналов, АКФ которых повторяет АКФ зондирующего сигнала.

Обработка сигнала обзора по дальности, поступающего от одного ПЭР выполняется сверткой – она реализует оптимальный прием УСП. Она дает полное использование всей энергии принятого сигнала, оптимальную оценку его параметров и получение заданного разрешения. Общая теоретическая радиотехника казывает, что взаимокорреляционная оптимальная обработка должна быть сверткой функций, имеющей вид [4, 5]:

$$\Lambda(\tau) = \int_{t_0-T}^{t_0+T} f_c(t-t_0) \cdot f_{op}(t-t_0-\tau) dt .$$
(1)

Здесь первая функция $f_c(t-t_0)$ под интегралом представляет собой принимаемый сигнал длительностью T, привязка центра которого к шкале аргумента (времени) t задается его значением t_0 , а вторая $-f_{op}(t - t_0 - \tau)$ – является опорной. Аргументом функции $\Lambda(\underline{\tau})$ (ВКФ) служит сдвиг τ по аргументу t (запаздывание) опорной функции (ОФ) $f_{op}(t - t_0 - \tau)$ относительно принятого сигнала $f_c(t - t)$. Функция $\Lambda(\underline{\tau})$ в каждой точке есть функционал приема сигнала $f_c(t-t)$, определяемый для всех возможных значений ее аргумента τ . Чем он выше, тем ближе величина τ к его истинному значению. Поэтому задача оптимального приема сводится к тому или иному способу отыскания такого функционала $\Lambda(\tau_m)$, который указывает на оптимальную оценку величины τ_m , то есть наилучшую оценку неизвестного значения параметра сигнала, которым является дальность цели τ .

Из выражения (1) следует, что оптимальный прием невозможен без опорной функции, описывающей точную форму и структуру сигнала (без помех и искажений). Однако, на практике точное знание опорной функции (ОФ) по тем или иным причинам невозможно, и тогда задачу оптимального приема сигнала приходится сводить к реализации *квазиоптимального* приема. Он, по определению, уже не является оптимальным алгоритмом. Однако он же обязан обеспечить допустимые малые потери энергии сигнала и разрешения, используя некоторую другую ОФ, являющуюся достаточно хорошим приближением к оптимальной, и, кроме того, удобной в практической работе.

Отметим, что существенную особенность обзора по координате дальность. Сигналы, принятые от всех ПЭР по дальности и входящие в один период повторения (а также и в любые другие периоды), отличаются друг от друга лишь сдвигом по аргументу, имея одинаковую форму (*стационарны* по *форме*). Поэтому свертка всех сигналов принимаемых от различных ПЭР₁ по координате дальность, должна использовать одинаковые ОФ, отличающиеся друг от друга лишь значениями параметра дальности (задержки). Стационарность принимаемых сигналов по форме при обзоре по дальности обеспечивает простую реализацию оптимального приема с помощью соответствующего одного фильтра или коррелятора с фиксированной опорной функцией.

Обзор протяженного объекта по координате азимут

Обзор протяженного объекта по координате азимут также является обычным радиолокационным измерением дальности до выбранного траверсного ПЭР. Однако он выполняется как многократный обзор одного и того же ПЭР по координате дальность, причем при условии обязательного движения РЛС относительно объекта.

Такие повторные измерения, в отличие от обычного обзора по координате дальность, производятся в масштабе скорости движения РЛС v_0 , определяемой относительно объекта наблюдения. Поэтому аргумент сигнала при обзоре по азимуту в технологии РСА принято называть «медленным временем» и обозначать его другим символом *T*. Результаты многократного измерения дальности $T_{\rm TC}$, представляют собой пачку радиоимпульсов, которую принято называть траекторным сигналом (TC). Она показана на рис. 2, *a*.



Рис. 2. Траекторный сигнал и функция наклонной дальности

Середину (центр) ТС удобно выбрать точкой его привязки к шкале времени и месту РЛС в общей системе координат, описывающей полет РЛС и место ПЭР. Выберем время начала ТС таким, чтобы его центр в момент времени T_0 находился на оси X(на траверсе). На рис. 2, δ показано, что несущая отдельных радиоимпульсов ТС в полете РЛС получает доплеровский сдвиг частоты F_m несущей f_0 . Значение сдвига F_m определяется проекцией вектора скорости РЛС v_0 на текущее направление наклонной дальности. Для реальной геометрии съемок зависимость частоты F_m от времени, обычно близка к линейной, а в точке траверса значение сдвига $F_m = 0$. Следовательно, ТС представляет собой сложный сигнал с ЛЧМ несущей.

Поэтому весь TC (пачку) можно повторно сжать в аргументе медленного времени T, свертывая ее с необходимой ОФ (вида рис. 2, a). Результатом свертки служит один краткий радиоимпульс с несущей, аналогично случаю обычного обзора по дальности (рис. 2, a). Теория говорит [5], что характеристики сжатия в основном определяются законом модуляции принятого сигнала. При этом комплексная амплитуда повторно полученного сжатого радиоимпульса представляет собой второе сечение РЛИ ПЭР по координате азимут, и она реализует разрешение по оси Y. Отсчет положения сжа-

того TC по координате азимут выполняется на оси медленного времени T по максимуму сигнала свертки в момент времени $T = T_0$ (с поправкой на длительность сжатия TC). Итак, два последовательных обзора (по координатам дальность и азимут) плоского ПЭР дают его РЛИ. Повторение этих операций для всех ПЭР, находящихся на площади наблюдаемого объекта, формирует РЛИ объекта.

Обычная интерпретация TC как ЛЧМ сигнала имеет более плодотворную альтернативу. Т. е., TC трактуется как радиосигнал с угловой и квадратичной фазовой модуляцией $\varphi(t)$ [5]. Несложно показать, что при естественной нормировке безразмерный закон угловой модуляции $\varphi(T)$ тождественен функции наклонной дальности (также безразмерной) R(T):

$$\varphi(T)/2\pi \equiv R(T)/\lambda. \tag{2}$$

Это обстоятельство сразу связывает воедино угловую модуляцию траекторного сигнала с кинематикой относительного движения РЛС и объекта, представленной функцией наклонной дальности (рис. 2, e). Известно [3], что длительность траекторного сигнала $T_{\rm TC}$ и разрешение по координате азимута $\tau_{\rm as}$ связаны между собой «соотношением неопределенности»

$$T_{\rm TC} \cdot \tau_{\rm a3} \approx 0.5 \ \lambda \left(R_0 / v_0 \right) \,. \tag{3}$$

Оно показывает тесную и прозрачную связь радиотехнических величин, характеризующих разрешение РЛИ, с кинематикой наблюдения точек объекта.

Соотношения (2, 3) наглядно демонстрируют, что вид и параметры ОФ в обзоре по азимуту определяются динамической геометрией пары РЛС–ПЭР, причем меняющейся для разных наблюдаемых точек объекта. Т. е., они наглядно отражают нестационарность оптимальной обработки и самой ОФ как ее ключевого элемента. Они же определяют ключевые потенциальные характеристики технологии РСА, обращаясь к кинематическим законам полета носителя РЛС и его навигационному обеспечению.

Опорная функция в обзоре по азимуту и ее описание

Обращаясь к классической схеме синтеза РЛИ нетрудно показать, что ОФ является гиперболой вида

$$R(T) = 2(R_0^2 + v_0 T^2)^{0.5}.$$
(4)

Из выражения (4) следует, что ОФ, как конкретная функция, прежде всего, определяется величиной наклонной дальности в траверсе R_0 , которая зависит от удаления ПЭР по оси X и притом на площади объекта меняет свою форму. Кроме того, очевидно, ОФ зависит от величины скорости v_0 носителя РЛС. Поэтому даже при модели движения РЛС (4) для каждого конкретного ПЭР теоретически необходимо формировать свою соответствующую парциальную ОФ. В реальности схема синтеза усложняется маневрированием и непостоянством скорости носителя РЛС на протяжении TC, а также многими другими неучитываемыми факторами. Поэтому практика ставит задачу замены теоретической ОФ ее квазиоптимальным аналогом. Последний должен давать допустимые потери при его свертке с группой TC, достаточно близких по форме, но описываемых как отличающихся друг от друга (и от ОФ, в том числе) по тем или иным параметрам.

Отсюда возникают практические задачи: 1) описания ОФ некоторым (желательно минимальным) набором параметров и 2) определения полос пропускания одной ОФ как квазиоптимального фильтра TC по этим параметрам. В литературе эти задачи рассматриваются слитно как оценка допустимого отличия реальной ОФ $d\varphi(T)$ [6,7] относительно ее теоретического вида. При этом принимается, что отклонения реальной ОФ от исходной описываются монотонной функцией, прогрессивно растущей по мере приближения к границам TC. Тогда отличие функций $d\varphi(T) \equiv dR(T)$ можно характеризовать простой разностью функций ОФ. Теория показывает, что влияние такой растущей разности сводится, прежде всего, к потерям мощности выходного сигнала, и лишь затем – к последующему прогрессивному падению разрешения. При этом критическим фактором служит максимум модуля разности ОФ ($|dR(T)|_m$), возникающей на границах TC.

На рис. 3, *а* показан характер изменения взаимокорреляционной функции ОФ для некоторого ряда возрастающих значений разности $|d\varphi(T)|_m$, начиная с нулевого.



Рис. 3. Влияние расстройки do на вид АКФ и разрешение по азимуту

Там же, на врезке рисунка показан характер разности $|d\phi|$, принятый при расчетах. Ход зависимостей деградации результатов свертки и разрешения (по уровню 0,7) от величины $|d\phi(T)|_m$, нормированных по нулевой разности $d\phi(T)$, приведен на рис. 3, δ . Эти зависимости позволяют выбирать конкретный допустимый уровень величины $|d\phi(T)|_m$. На практике в качестве оценки граничного консервативного значения $|d\phi(T)|_m$ может быть принята величина $|d\phi(T)|_m/2\pi \le 1/8 = 45^\circ$, которая в единицах нормированной наклонной дальности соответствует допуску $2|dR(T)|_m/\lambda = 1/16$. В этом случае доля реализуемой энергии не будет опускаться ниже относительного уровня 0,9, а ухудшение разрешения будет незначительным.

Разрешение по азимуту и аппроксимация опорной функции

Рассмотрим описание ОФ (4), заданной немногими параметрами, оценим характеристики ОФ, найдем производные ОФ по ним и соответствующие полосы пропускания.

Для начала разложим ОФ для базовой схемы (4) в ряд Маклорена, где движение РЛС задано только двумя параметрами, а именно, постоянными R_0 и v_0 , заданными в траверсной точке. Такое представление ОФ является усеченным степенным рядом в траверсной точке разложения при T = 0 при аргументе медленное время T:

$$2R(T) / \lambda = 2(R_0 /)(v_0 / \lambda)(v_0 / R_0)T^2 - -(1/4)(v_0 / \lambda)(v_0 / R_0)^3 T^4 + (1/8)(v_0 / \lambda)(v_0 / R_0)^5 T^6 + \dots$$
(5)

Этот ряд позволяет оценить число членов усеченного ряда, дающее приближение ОФ с заданными ошибками ее описания как функций 2R(T) или $\varphi(T)$. Взяв отношение соседних членов ряда, можно видеть, что относительный вес высших слагаемых с ростом степени T быстро убывает. Их поведение, в основном, определяет малый коэффициент (v_0 / R_0) в каждом члене, последовательно возводимый в резко возрастающую степень (например, для космического наблюдения коэффициент (v_0 / R_0) составляет величину (v_0 / R_0) $\approx 1,10^{-2}$). Поэтому для приближенного представления ОФ усеченным рядом (4) допустимо в качестве ошибки приближения принять первый отброшенный член ряда. Однако понятно, что при этом его величина не должна превышать значений некоторой принятой допустимой ошибки $|d\varphi(T)|_m$ этого же приближения ОФ.

Представление ОФ в форме ряда (5) позволяет найти связь первого отброшенного члена с наивысшим возможным разрешением. Для этого возьмем первый член ряда, отброшенный после 2-й степени *T*, определим величину $T_{\rm TC}$ по формуле (3), подставим значение $T=T_{\rm TC}/2$ и приравняем результат допустимой ошибке $|d\varphi(T)|_{\rm m}$. Тогда полученное равенство сразу дает оценку предельно достижимого разрешения по азимуту $\tau_{\rm a3}$ для аппроксимации ОФ рядом 2-й степени:

$$\tau_{a3} = \geq [(R_0 \lambda^3) / (2^{10} |d\phi(T)|_m / 2\pi)]^{0.25} .$$

Например, для случая космического наблюдения, примем, как исходные, значения $|d\varphi(T)|_m/2\pi \le 1/8$, $\lambda = 3$ см и $R_0 = 750$ км. Тогда при квадратичной аппроксимации ОФ предельное разрешение по азимуту составит $\tau_{a3} \ge 0.80$ м, а необходимая длительность траекторного сигнала по формуле (3) равна $T_{rc} = 2.3$ с. Если же отбросить в ряду (5) члены с 6-й степенью и выше, то предельное разрешение станет равным

$$\tau_{a_3} = \left[\left(R_0 \lambda^5 \right) / \left(2^{12} \left| d \varphi(T) \right|_m / 2\pi \right) \right]^{1/6}.$$

Для того же примера, получим $\tau_{a3} \ge 0,20$ м и $T_{rc} = 9,20$ с.

Итак, в базовой схеме (рис.1) предельное разрешение по азимуту определяется только ошибкой $|d\varphi(T)|_m$, дальностью наблюдения R_0 и длиной волны несущей λ . Также, видно, что при $\tau_{a3} \ge 0.80$ м для любых ПЭР, расположенных в пределах всей

площади объекта наблюдения, все ОФ будут представляться *различными* параболами. Коэффициенты этих парабол задаются значениями параметра R_0 для этих ПЭР, а также величиной v_0 . Поэтому в данной базовой схеме рабочей характеристикой ОФ (как квазиоптимального фильтра различных TC) могут служить допустимые вариации параметров dR_0 и dv_0 . Здесь параметр dR_0 определяет разброс удаления траверсного ПЭР относительно РЛС, а величина dv_0 – возможные вариации линейной скорости РЛС.

Согласование опорной функции с условиями обзора

Приведенный пример с базовой схемой синтеза рис. 1 неполон, так как не учитывает возможную кривизну и неравномерность полета РЛС по траектории. Это можно учесть, задав ускорение g_0 движения РЛС также в траверсной точке. Покажем, как можно оценить полосы пропускания квазиоптимального фильтра по всем трем параметрам синтеза: R_0 , v_0 и g_0 , ограничиваясь случаем квадратичного приближения ОФ.

Начнем с параметра R_0 . Введя вариации dR_0 и изменяющуюся дальность $R_{0R} / R_0 = (1 + dR_0 / R_0)$ в формулу (5), продифференцируем дальность по dR_0 . Тогда имеем:

$$d\phi_0(T) / d(dR_{0R}) = (4\pi/\lambda) - (2\pi/\lambda)(v_0/R_0)^2 T^2 + \dots$$

$$(3\pi/2\lambda)(v_0/R_0)^4 T^4 - (5\pi/4\lambda)(v_0/R_0)^6 T^6$$
(6)

Исключим в разложении (6) первый член разложения, не зависящий от параметра R₀. Далее, так как члены со степенями выше 2-й быстро убывают, исключим и их. Тогда видно, что зависимость $d\varphi(T)$ от dR_{0R} квадратична, а величины dR_{0R} , равно как $d\phi(T)$, должны быть ограничены. Для dR_{0R} $d\phi_0(T)$ И И имеем: $dR_{0R} = (\lambda / 2\pi)(R_0 / v_0)^2 (d\varphi_0(T) / T^2)$. Ποдставив сюда как и ранее, значение $T=T_{\rm TC}/2$, полученное из (3), а также $d\varphi_0(T)/T^2 = |d\varphi(T)|_m$, найдем «полосу пропускания» ОФ по параметру dR_{0R} : $dR_{0R} = (8 / \pi) (\tau_{a_3}^2 / l) |d\varphi(T)|_m$.

Как пример, для принятой величины $|d\phi(T)|_m/2\pi \le 1/8$ получим $dR_{0R} = 2(\tau_{a3}^2/\lambda)$.

Действуя аналогично, для вариаций dv_0 параметра v_0 находим выражения $dv_0 = (4 / \pi)(\tau_{a_3}^2 / \lambda)(v_0 / R_0) |d\phi(T)|_m$ и, для $|d\phi(T)|_m/2\pi \le 1/8$ получим $dv_a = (\tau_{a_3}^2 / \lambda)(R_0 / v_0)$.

При этом вектор вариации скорости взят направленным по полету носителя РЛС. Вариации dg_{0R} параметра g_{0R} , напротив, выберем по направлению траверса. Тогда, подставив в формулу (5) выражение $R(T)=2R(T)+0.5dg_{0R}T^2$, получим равенство $dg_{0R} = (8 / \pi)(\tau_{a_3}^2 / 1)(R_0 / v_0) |d\varphi(T)|_m$ и оценку $dg_{0R} = 2(\tau_{a_3}^2 / \lambda)(R_0 / v_0)^2$

для $|d\varphi(T)|_m/2\pi \le 1/8$. Для полноты картины, ниже приведем пример ряда рассчитанных полос пропускания (ОФ) по параметрам dR_0 , dv_{0Z} и dg_{0R} для $d\varphi_m = \pi/8$, набора значений τ_{a3} и $(v_0/R_0) \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$):

$$dR_{0Rm} = 2(\tau_{a3})^2 / \lambda$$
; $dv_{0Zm} = (\tau_{a3})^2 / \lambda$) $(v_0 / R_0$; $dg_{0Rm} = 2(\tau_{a3})^2 / \lambda$) $(v_0 / R_0)^2$

Этот пример наглядно показывает пределы действия одной опорной функции и проблемы, рождаемые квадратичной зависимостью полос пропускания свертки по параметрам движения РЛС при получении желаемого разрешения по азимуту. Приводимые значения dR_{0Rm} , dv_{0Zm} , и dg_{0Rm} прямо пропорциональны значению $d\phi_m$ и обратно пропорциональны длине волны несущей λ . Поэтому для других пределов фазовой ошибки и диапазонов несущих пересчет значений полос пропускания не составит труда. Найденные полосы пропускания указывают структуру многоканальной обработки по параметрам R_0 , v_{0Z} и g_{0R} , или процедуру поиска в случае неизвестности области их определения.

Таблица 1

		-		· · ·	/			-		02	0.01		
	Разр. по аз.	3,0	1,5	1,0	0,75	0,50	0,40	0,25	0,12	0,08	0,06	0,03	0,02
λ	τ _{a3} , M	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	3,75	6,0	12,5	18,8	25,0	50	75
Зсм	dR_{0Rm} , км	0,01	0,03	0,075	0,135	0,30	0,47	0,20	5,21	11,7	20,8	83,3	250
	<i>dv_{0Zm}</i> , м/с	0,04	0,16	0,375	0,665	1,50	2,34	6,00	26,0	58,6	104	416	600
	dg_{0Rm} , MM/c ²	0,83	3,33	7,50	13,3	30,0	46,9	120	521	1172	2083	8333	18750

Полосы пропускани	а (ОФ) по параметрам	$dR_{0} dv_{0} = u d\sigma_{0}$
полосы пропускани	а ссида по параметрам	1 <i>UNA. UVAZ N UYAD</i>

Синтез опорной функции по данным о траектории КА

В координатной форме описание ОФ (4) имеет вид:

$$R(T) = (\sum (x_i(T) - x_{i0p})^2)^{0.5}$$

Пусть в ГПССК массив текущих координат РЛС x_i для TC, и координаты траверсного ПЭР x_{i0p} определены. Аргумент траекторного сигнала *T* зададим в отклонениях от момента T_0 , равных $dT=T-T_0$, и лежащих в пределах ($-0.5T_c \le dT \le 0.5T_c$). Однако для анализа и практики задание исходных данных $x_i(T)$ о движении КА массивом неудобно.

Поэтому определим текущие координаты КА x_i(T) простым прогнозированием движения РЛС по начальным условиям (НУ) на отрезке траектории (дуге) длиной T_{TC} Определим *расширенный* вектор состояния (PBC) КА в виде вектора $\vec{N} = (\vec{x}, \vec{v}, \vec{g}; T)$. с аргументом время T, как блочного, объединяющего уже известные вектора $\vec{x}, \vec{v}, \vec{v}$ новый вектор $\vec{g} = (g_{x}g_{y}g_{z})$. Вектор \vec{g} сообщает текущие значения ускорений правых уравнений движения КА, выраженных частей в ГПССК. Тогла вектор $\vec{N}_0 = (\vec{x}_0, \vec{v}_0, \vec{g}_0; T_0)$, представит расширенные НУ движения КА на дуге длиной 0.5TC в момент времени T_0 . Текущие компоненты вектора \vec{N} КА даются навигационным обеспечением КА. Компоненты $\vec{x}, \vec{v}, \vec{g}$ вектора \vec{N} на дуге TC, удобно задать полиномами времени Т невысокого порядка. Коэффициентами полиномов являются пошаговые приращения параметров траектории в данных прогноза движения КА.

Например, для полинома первого порядка текущие вектора $\vec{x}, \vec{v}, \vec{g}$ в момент времени *T* запишем как $\vec{v} = \vec{v}_0 + d\vec{v}_0 \cdot T$, $\vec{g} = \vec{g}_0 + d\vec{g}_0 \cdot T$, а вектор \vec{x} в момент *T* найдем по векторам \vec{v}, \vec{g} . Тогда $\vec{x} = \vec{x}_0 + (\vec{v}_0 + d\vec{v}_0 \cdot T)T + 0, 5(\vec{g}_0 + d\vec{g}_0 \cdot T) \cdot T^2$ есть текущие координаты КА, где вектора $d\vec{v}_0, d\vec{g}_0$ являются малыми первого порядка относительно векторов \vec{v}, \vec{g} . Подставив вектор \vec{x} в R(T), добавив координаты траверсного ПЭР $\vec{x}_{0p} = \text{const}$, и используя скалярное произведение векторов $(\vec{a}^T \cdot \vec{b})$ в координатной форме, после элементарных преобразований получим общее выражение для ОФ:

$$R(T) = \begin{bmatrix} \left| \vec{R}_0 \right|^2 + 2(\vec{R}_0^T \cdot \vec{v}_0)T + \left[\left| \vec{v}_0^2 \right| + (\vec{R}_0^T \cdot \vec{g}_0) + 2(\vec{R}_0^T \cdot d\vec{v}_0) \right] T^2 + \left[(\vec{v}_0^T \cdot \vec{g}_0) + 2(d\vec{v}_0^T \cdot \vec{g}_0) + \right] \\ + (\vec{R}_0^T \cdot d\vec{g}_{\cdot 0}) T^3 + [0, 25 \left| \vec{g}_0 \right|^2 + \left| d\vec{v}_0 \right|^2 + (\vec{v}_0^T \cdot d\vec{g}_0) + (d\vec{v}_0^T \cdot \vec{g}_0) T^4 + \left[(d\vec{v}_0^T \cdot d\vec{g}_0) + \right] \\ + 0, 5(\vec{g}_0^T \cdot d\vec{g}_0) T^5 + 0, 25 \left| d\vec{g}_0 \right|^2 T^6 \end{bmatrix}^{-1}$$

Полученное общее выражение можно упростить. Прежде всего, исключим член $2(\vec{R}_0^T \vec{v}_0)T$ с первой степенью *T*, так как вектора R_0^T , v_0 по определению траверсной плоскости ортогональны. Далее, все члены, содержащие вектора вида $d\vec{a}$ сгруппируем в поправку ε первого порядка малости относительно всех оставшихся членов. Наконец, вынесем член $|\vec{R}_0|^2$ из под корня и снова используем скалярное произведение, но уже в тригонометрической форме. Тогда приближение для ОФ примет вид :

$$\tilde{R}(T) = R(T) / \left| \vec{R}_0 \right| = \begin{bmatrix} 1 + \left[\left| \vec{R}_0 \right|^{-2} \left| \vec{v}_0 \right|^2 + \left| \vec{R}_0 \right|^{-1} \left| \vec{g}_0 \right| \cos(\vec{R}_0 \angle \vec{g}_0) \right] T^2 + \\ + \left[\left| \vec{R}_0 \right|^{-2} + \left| \vec{v}_0 \right| \left| \vec{g}_0 \right| \cos(\vec{v}_0 \angle \vec{g}_0) \right] T^3 + \\ + 0, 25 \left| \vec{R}_0 \right|^{-2} \left| \vec{g}_0 \right|^2 T^4 + \varepsilon \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Теперь хорошо видно, что все члены суммы оказываются существенно меньшими единицы. Члены со степенью *T* выше двух также малы, и все они входят в остаточный малый член ε . Тогда, разложив радикал ОФ: $\tilde{R}(T) = (1 + \mu)^{-0.5} = 1 + 0, 5m - 0, 125\mu^2 + ...$ по малому параметру $\mu << 1$ получаем окончательно выражение параболы 2-й степени:

$$\tilde{R}(T) \approx (1+0,5\mu) \approx 1+0, 5[\left|\vec{R}_{0}\right|^{-2} \left|\vec{v}_{0}\right|^{2} + \left|\vec{R}_{0}\right|^{-1} \left|\vec{g}_{0}\right| \cos(\vec{R}_{0} \angle g_{0})]T^{2}.$$
(6)

Полученное приближение ОФ для $\tilde{R}(T)$ ясно показывает роль и взаимодействие всех трех компонент вектора N_0 . Основную роль играет траверсная наклонная дальность R_0 . Затем, ее значение корректируется модулем относительной скорости v_0 . Наконец, появляется поправка к скорости – проекция вектора управляющего ускорения g_0 (напомним, в ГПССК!) на направление вектора траверсной наклонной дальности R_0 . Полученное приближение при необходимости подсказывает пути его уточнения повышением порядка полинома. Далее, оно позволяет оценить вклад различных компонент в ошибку ОФ, если для нее задана требуемая точность представления. Наконец, оно подсказывает логику анализа случая ОФ для некосмического носителя PCA.

Итак, оказывается, что ОФ R(T) при общих условиях и разрешении $\tau_{a3} \ge 0.80$ м, является параболой. Ее коэффициент при квадратичном члене, объединяет вклад всех компонент вектора расширенных НУ движения КА в траверсной точке N_0 , но будет меняться для различных ПЭР.

Для частных случаев носителей РЛС и траекторий полета справедливость квадратичного приближения ОФ и области его применения можно подтвердить, проведя анализ параметров реальных траекторий носителя РСА и оценивая в их изменчивости. Это проще всего выполнить численным конкретным моделированием определения ОФ. Для космического носителя это полностью подтверждается, однако изложение полученных (и других сопутствующих) результатов выходит за ограниченные рамки данной статьи.

Квадратичное приближение подсказывает два способа определения функции $\widetilde{R}(T)$ по составляющим вектора $(\vec{x}, \vec{v}, \vec{g}; T)$. Первый из них заключается в ее явном расчете по выражению (6) и данным для выбранной точки траектории КА.

Второй же способ основывается на том же квадратичном приближении ОФ. Так как парабола определяется двумя параметрами, то для ее неявного расчета (учитывающего компоненты вектора $\vec{N} = (\vec{x}, \vec{v}, \vec{g}; T)$) необходимо и достаточно иметь два измерения текущей наклонной дальности до выбранного траверсного ПЭР, принадлежащих двум точкам ТС КА. Очевидно, что наиболее удобно использовать точки центра и края дуги ТС. Текущие координаты КА могут поступать от навигационного обеспечения его полета.

Схема космического радиолокационного зондирования

В случае космического радиолокационного наблюдения схема, приведенная на (рис. 1), качественно изменяется, ориентируясь на поддержку технологии РСА и принимает вид, показанный на рис. 4. То есть, теперь классическая схема должна встраиваться в геометрическую глобальную прямоугольную систему координат, связанную с Землей (гринвичскую) и объединенную со шкалой единого (всемирного) времени (ГПССК). Текущие параметры траектории полета КА, вектор $\vec{N} = (\vec{x}, \vec{v}, \vec{g}; T)$ служат той координатно-временной основой, в которой реализуется технология РСА.

В этой схеме текущие параметры полета КА, дуги синтеза траекторий, и сами траекторные сигналы, представляют собой заведомо нестационарные и динамически изменяющиеся во времени объекты, эволюции которых необходимо учитывать и отслеживать в тех или иных пределах. Вектор скорости по-прежнему определяет траверсную плоскость, а также привязку траверсного ПЭР к поверхности Земли. Реальная фигура Земли должна представляться сжатым общеземным эллипсоидом (ОЗЭ) вращения ПЗ-90, как опорная поверхность, узаконенная постановлением Правительства России.



Рис. 4. Схема синтеза при космическом обзоре

Привязка точки радиолокационного изображения в РСА

Пусть в момент времени T_0 центр траверсного ПЭР, задан углом β линии привязки ПЭР (рис.4), определяющим ее *параметры*. Определение координат центра траверсного ПЭР по известным текущим радиус-вектору КА $\vec{x}_0(x_0, y_0, z_0)$, вектору скорости $\vec{v}_0(v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})$ КА и полуосям ОЗЭ *a*, *b*, *c* выполняется в ГПССК 5-ю шагами [8]:

1. Находим компоненты вектора \vec{W}_{Γ} , определяя векторное произведение радиусвектора КА \vec{x}_0 на вектор скорости \vec{v}_0 : $\vec{w}_{\Gamma} = \vec{x}_0 \times \vec{v}_0$. Эти компоненты равны: $w_x = y_0 v_{0z} - z_0 v_{0y}$; $w_y = z_0 v_{0x} - x_0 v_{0z}$; $w_z = x_0 v_{0y} - y_0 v_{0x}$. Дополнительно находим норму вектора $|\vec{w}_{\Gamma}|$ как $|\vec{w}_{\Gamma}| = (w_x^2 + w_y^2 + w_z^2)^{0.5}$, а затем и его направляющие косинусы: $\cos \alpha_w = w_x / |\vec{w}_{\Gamma}|$; $\cos \beta_w = w_y / |\vec{w}_{\Gamma}|$; $\cos \gamma_z = w_z / |\vec{w}_{\Gamma}|$.

2. Находим компоненты вектора $\vec{s}_{\Gamma} = \vec{w}_{\Gamma} \times \vec{v}_0$, направленного от КА к точке траверса на трассе КА, его норму и направляющие косинусы:

$$s_{x} = w_{y}v_{0z} - w_{z}v_{0y}; \quad s_{y} = w_{z}v_{0x} - w_{x}v_{0z}; \quad s_{z} = w_{x}v_{0y} - w_{y}v_{0x};, \quad \left|\vec{s}_{\Gamma}\right| = (s_{x}^{2} + s_{y}^{2} + s_{z}^{2})^{0.5}; \\ \cos \alpha_{s} = s_{x} / \left|\vec{s}_{\Gamma}\right|; \quad \cos \beta_{s} = s_{y} / \left|\vec{s}_{\Gamma}\right|; \quad \cos \gamma_{s} = s_{z} / \left|\vec{s}_{\Gamma}\right|.$$
3. Вычисляем направляющие косинусы вектора линии привязки R_0 поворотом осей w_r, s_r , в траверсной плоскости на угол β :

 $\cos \alpha_r = \cos_s \cdot \cos \beta + \cos \alpha_w \cdot \sin \beta; \quad \cos \beta_r = \cos_s \cdot \cos b + \cos \beta_w \cdot \sin \beta; \\ \cos \gamma_r = \cos_s \cdot \cos \beta + \cos \gamma_w \cdot \sin \beta.$

4. Находим наклонную дальность R_0 от КА до точки пересечения линии привязки с ОЗЭ, заданного выражением $x^2/a^2+y^2/b^2+x^2/c^2 = 1$. Линию привязки, проходящую через точку \vec{x}_0 в направлении, которое уже задано формулами п. 3, определим как параметр R_0 в системе трех уравнений: $x = x_0 + R_0 \cos \alpha_r$; $y = y_0 + R_0 \cos \beta_r$; $z = z_0 + R_0 \cos \gamma_r$. Тогда координаты точки ее пересечения $\vec{x}_p(x_p, y_p, z_p)$ с поверхностью ОЗЭ, находятся подстановкой уравнения линии в уравнение ОЗЭ. Подставив их, получаем квадратное уравнение относительно наклонной дальности R_0 в виде

$$AR_{0}^{2} + 2BR_{0} + C = 0, \text{ rge } A = b^{2}c^{2}\cos^{2}\alpha_{r} + a^{2}c^{2}\cos^{2}\beta_{r} + a^{2}b^{2}\cos^{2}\alpha_{r},$$

$$B = b^{2}c^{2}x_{0}\cos^{2}\alpha_{r} + a^{2}c^{2}y_{0}\cos^{2}\beta_{r} + a^{2}b^{2}z_{0}\cos^{2}\alpha_{r},$$

$$C = b^{2}c^{2}x_{0} + a^{2}c^{2}y_{0} + a^{2}b^{2}z_{0} - a^{2}b^{2}c^{2}.$$

Решение уравнения есть: $R_{1,2} = -B \pm (B^2 - AC)^{0.5}/A$, а величина R_0 выбирается как минимальное значение из двух решений $R_{1,2}$. Мнимость решения указывает на отсутствие пересечения линии привязки с поверхностью ОЗЭ.

5. В заключение находятся координаты привязываемого ПЭР $\vec{x}_p(x_p, y_p, z_p)$. Они определяются подстановкой величины R_0 , найденной по п.4, в формулу параметрического задания линии привязки. Поскольку найденные координаты привязанного ПЭР определены в ГПССК, то они в ней же позволяют выполнить по ним относительную привязку остальных точек целого РЛИ. Отметим, что процедура и точность привязки полностью определяются знанием кинематических параметров носителя РЛС. В свою очередь, последние также целиком определяются навигационным обеспечением полета носителя РЛС. В частности, исчерпывающим решением вопроса является системное использование космических навигационных систем типа ГЛОНАСС/GPS.

Выводы

 Проведен системный и междисциплинарный анализ основных принципов построения современного комплекса космического радиолокационного обзора земной поверхности, использующего технологию PCA.

2. Рассмотрены общие характеристики алгоритмов оптимального синтеза радиолокационного изображения и его точной привязки к глобальной геоцентрической связанной системе координат. Показано, что исчерпывающими исходными данными для этих операций являются лишь параметры траектории полета носителя РСА, получаемые от системы навигационно-баллистического обеспечения полета КА.

3. Полученные результаты могут использоваться в разработках технологии PCA с высоким разрешением, использующим как космические, так и некосмические носители РЛС.

Литература

1. Реутов А. П. и др. Радиолокационные станции бокового обзора. - М.: Советское ра-

дио, 1970. – 360 с.

2. Верба В. С., и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования // Радиотехника. – 2010. – 676 с.

3. Кокорин В. И., Поль В. Г. Технология радиолокации с синтезом апертуры: Методическое пособие. – Красноярск: СФУ, 2007. – 203 с.

4. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.

5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.

6. Горяинов В. Т. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. – М.: Радио и связь, 1988. – 384 с.

7. Кондратенков Г. С. Фролов А. Ю. Радиовидение – радиолокационные системы зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

8. Евграфов А. Е., Поль В. Г. Геометрия космического радиолокационного зондирования Земли по технологии синтезированной апертуры и координатная привязка полученных изображений, Вестник ФГУП НПО и. С. А. Лавочкина, 2015, № 2, 19. – 25 с.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДАННЫМИ ДЗЗ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, ОСНАЩЕННЫХ ПОРТАТИВНЫМИ СРЕДСТВАМИ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

А. Н. Черный, В. Г. Поспелов

(«НИИ космических систем имени А. А. Максимова» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева»), **Т. А. Арефьева** (АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»)

Аннотация. Тенденции в развитии аппаратно-программных средств и технологий приема и обработки информации ДЗЗ, а также нарастающие возможности мобильных платформ и разрабатываемых для них сервисов и приложений, позволяют ставить вопрос об обеспечении доступа потребителей, оснашенных портативными средствами отображения информации индивидуального пользования, непосредственно к хранилищу данных ДЗЗ. Облачные технологии такого доступа будут предоставлять удаленному потребителю через соответствующие интерфейсы возможность не только получать готовые информационные продукты, но и производить их под информационные потребности решаемых задач. В статье приводится вариант архитектуры системы для обеспечения удаленного доступа потребителей с портативных средств к хранилищу данных ДЗЗ. Предполагается, что такая система может быть востребована удаленными потребителями, действующими в условиях динамически развивающейся ситуации (спасателями, миротвориами, разведчиками и пр.) для мониторинга локальной обстановки, повышения степени восприятия географической и тактической информации, осмысления поставленных задач, оперативности выработки и доведение решений для их выполнения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, информационные системы, технологии беспроводной связи, технологии двойного назначения, портативные средства отображения информации, удаленный доступ, обработка данных ДЗЗ, хранилище данных, облачные технологии.

Стремительное развитие информационно-космических технологий в настоящее время привело к резко выросшим требованиям к разрабатываемым технологиям приема, обработки и распространения информации, полученной при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). На данный момент можно выделить следующие тенденции в развитии космических систем (КС) ДЗЗ:

расширение площади наблюдаемых территорий;

- увеличение разрешения космической съемки;

- увеличение периодичности наблюдений;

– развитие мульти- и гиперспектральной аппаратуры, устанавливаемой на космические аппараты (КА).

Этот вектор объясним расширяющимся в настоящее время спектром задач в различных социально-экономических сферах, информационное обеспечение которых опирается на высокодетальные космические снимки, получаемые с периодичностью от суток до нескольких часов. И, конечно, при этом требуется высокая оперативность доведения этих снимков до потребителя. При этом в условиях все расширяющихся возможностей портативных средств отображения информации индивидуального пользования (ПСОИИП) актуализируется вопрос об оперативном предоставлении информации ДЗЗ пользователям различных мобильных устройств путем предоставления с них удаленного доступа непосредственно к базе данных, поиск в ней необходимой информации и ее отображении на экранах ПСОИИП.

Такими потребителями ДЗЗ, например, могут быть спасатели, работающие в очагах чрезвычайной ситуации, характеризующейся скоротечной динамикой на большой площади (лесные пожары, наводнения, сходы лавин, селей и пр.). В этом случае возможность получения информационных продуктов обработки данных ДЗЗ позволит проводить оперативный мониторинг локальной обстановки, что положительно скажется на эффективности проведения работ.

При этом, принимая во внимание, что для обеспечения информацией ДЗЗ конечного потребителя его достаточно оснастить лишь ПСОИИП без разворачивания специализированных аппаратно-программных комплексов обработки данных ДЗЗ, круг таких потребителей данных космической съемки может быть сколь угодно широким. Здесь можно рассматривать, например, потребителей:

 чья работа диктует повышенные требования к оперативности получения данных ДЗЗ;

 производящих мониторинг сельскохозяйственных территорий для оценки эффективности посевов и т. д.;

- производящих анализ территории, вверенной под строительство.

Можно выделить и иных потребителей из различных организаций и частных лиц, которым необходима своевременная информация ДЗЗ для района интересов.

Решение данной задачи может быть реализовано в парадигме Единой территориально-распределенной информационной системы (ЕТРИС), предусматривающей автоматизацию процесса обработки информации ДЗЗ, распределенное хранение готовых информационных продуктов, внедрение в эти процессы технологии облачных вычислений и удаленный доступ потребителей к ее информационным ресурсам. Создатели ЕТРИС говорят, что она нацелена на создание своего рода информационного конвейера, существенно упрощающего доступ потребителей к данным ДЗЗ. В то же время создатели ЕТРИС не ведут речь об интеграции входящих в нее разнородных ресурсов, что накладывает на процесс доступа определенные ограничения, связанные со спецификой предоставляемых ресурсами индивидуальных инструментариев.

При таком подходе можно говорить, что уже в среднесрочной перспективе конечные потребители получат не только доступ к базе данных для извлечения готовых информационных продуктов (ИНФПРО), но и возможность самостоятельно их производить через геопорталы с использованием предоставляемого ими инструментария.

Однако вести речь о непосредственном доступе с ПСОИИП ко всем ресурсам ЕТРИС очевидно нецелесообразно – конкретным потребителям необходим доступ к информации по ограниченному району интереса. Следовательно, следует вести речь о наличии некоторого промежуточного звена – например, регионального ситуационного центра (СЦ), обеспечивающего с ПСОИИП доступ только к некоторому ограниченному объему информации с возможность не только вести непосредственный поиск информации в хранилище, но и запрашивать отсутствующую в нем информацию.

Для решения подобной задачи может быть использована архитектура, приведенная на рисунке [1].

Архитектура построена по технологии «Клиент – сервер» [2].

Серверный модуль представлен программной компонентой распространения информации (ПК РИ ПС), загруженной на рабочую станцию распространения информации (РСРИ), размещенной на СЦ.

ПК РИ ПС предназначен для выполнения следующих функций:

– доступ к каталогу хранилища информации ДЗЗ;

предоставление доступа ПОПСИП к данным каталога хранилища информации Д33;

- передача различных ИНФПРО на ПСОИИП по беспроводному каналу.



Рисунок 1 – Архитектура системы информационного обеспечения потребителей, оснащенных ПСОИИП

Архитектура системы информационного обеспечения потребителей, оснащенных ПСОИИП

Клиентский модуль представлен программной компонентой анализа информации (ПК АИ ПС), который загружен в ПСОИИП.

ПК АИ ПС позволяет:

- отображать данные каталога хранилища информации ДЗЗ;

 – получение ИНФПРО из хранилища информации ДЗЗ и их отображение на экране ПСОИИП;

 отправлять в ПК РИ ПС задание на тематическую дообработку выбранного продукта ДЗЗ или оставлять заявку на получение отсутствующих данных;

передавать информацию о местоположении ПСОИИП;

- отображать местоположения ПСОИИП;

– проводить измерения расстояний по геопривязанным изображениям.

Для обеспечения независимости доступа с ПСОИИП к хранилищу информации ДЗЗ и использования возможностей облачных вычислений на РСРИ создаются виртуальные машины (ВМ) по числу ПСОИИП. В каждую ВМ загружается ПК АИ ПС, который взаимодействует с программной компонентой доступа к информации (ПКДИ), размещенной в хранилище информации ДЗЗ и загруженной в гипервизор РСРИ. Аналогичная ПКДИ загружена в сервер хранилища, что обеспечивает автоматизированный удаленный доступ к нему с ПСОИИП.

При отсутствии в хранилище информации Д33 необходимых ИНФПРО пользователь ПСОИИП формирует запрос на требуемый информационный продукт и отправляет его на РСРИ. Оператор РСРИ в свою очередь формирует заявку на производство отсутствующего в хранилище ИНФПРО и пересылает ее координатору (см. рис. 1).

Координатор посредством информационно-поискового интерфейса (ИПИ) обращается к внешним ресурсам и с использованием предоставляемого ими инструментария формирует требуемый ИНФПРО. Координатор может актуализировать полученный ИНФПРО, наполнив его информационными слоями, содержащими данные мониторинга наземных датчиковых систем.

После этого ИНФПРО направляется в хранилище информации ДЗЗ и становится доступным для выдачи потребителю на район интереса, а координатор сообщает оператору РСРИ информацию о готовности ИНФПРО и месте его хранения.

Эта информация направляется на ПСОИИП, с которого получен запрос на получение ИНФПРО. После этого потребитель с ПСОИИП может вновь обратиться в хранилище информации ДЗЗ и получить ИНФПРО, созданный по запросу.

Для наполнения хранилища информацией координатор анализирует его каталог и заблаговременно наполняет архив информацией, актуальной для данной местности и соответствующей решаемым задачам.

В рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» были проведены проектирование и разработка экспериментальных образцов, на основе которых может быть создана подобная система. Испытания экспериментальных образцов продемонстрировали возможность практической реализации подобной архитектуры.

Следует подчеркнуть, что подобная архитектура системы информационного обеспечения удаленных потребителей оснащенных ПСОИИП может иметь и двойное назначение.

Здесь следует иметь в виду, что применение технологии беспроводного доступа к распределенным информационным ресурсам является ключевым при решении задач как в тактической глубине противника, так и тактическом звене своих войск, что, например, отмечается [3 – 5]. Военные эксперты сходятся во мнении, что ситуативная осведомленность в тактическом звене управления требует обеспечения командиров и отдельных бойцов самой «свежей», полносвязной в едином географическом, тактическом и навигационном контексте, тактической информацией. Решение подобной задачи может быть найдено с применением ПСОИИП.

При таком подходе архитектура, представленная на рисунке, может быть трансформирована в более приемлемую на тактическом уровне архитектуру.

Адаптация системы информационного обеспечения потребителей, оснащенных ПСОИИП, для тактического звена управления позволит повысить степень восприятия географической и тактической информации, оперативность выработки и доведение решений, осмысливание поставленных боевых задач и их выполнения. Применительно к потребителю с ПСОИИП это позволит предоставить ему возможность получать на района наблюдения не только видеоизображения от оптоэлектронных космических средств наблюдения, но и тематически обработанные изображений от мультиспектральной и гиперспектральных аппаратуры, а также изображения с дополнительными информационными слоями в соответствии с решаемыми задачами.

Дополнительно на ПСОИИП может передаваться видеоинформация в реальном масштабе времени и от других источников оперативной информацией, например, с беспилотных летательных аппаратов.

Литература

1. Экспериментальные образцы аппаратуры территориально-распределенных аппаратно-программных средств приема и обработки информации. Дополнение к техническому проекту. АУВМ.466535.005 ПЗ 01 / НИИ КС. – 2016. – 324 с.

2. Отчет о НИР «Разработка технологии и создание экспериментальных образцов аппаратуры территориально-распределенных аппаратно-программных средств обработки, распространения и хранения информации, получаемой от перспективной малогабаритной аппаратуры ДЗЗ» / НИИ ТП. – 2016 г. – 64 с.

3. Плавунов С., Носиков С. Системы и средства связи тактического звена управления Сухопутных войск США // Зарубежное военное обозрение. – 2012. – № 4. – С. 42 – 47.

4. Шебаршин. Американская ACYB FBCB2//URL: http://dragon-firstru.livejournal.com/33339.html (дата обращения 14.03.2017).

5. Янов. Система боевого управления Сухопутных войск США в звене «Бригада и ниже» // Зарубежное военное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 43 – 50.

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ЛИНЕЙНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

П. Ю. Орлов, В. В. Некрасов

(АО «Корпорация «ВНИЙЭМ»)

Аннотация. Одним из параметров, характеризующих работу целевой аппаратуры (ЦА), является линейное разрешение на местности (ЛРМ). По зарубежным оценкам, современная целевая аппаратура второго поколения обладает геометрическим разрешением (GSD) от 0,5 до 2,5 м для панхроматического канала и от 2,4 до 5,0 м для мультиспектральных снимков. Это считается достаточным для решения картографических задач, таких как создание и обновление топографических карт масиитаба 1:5000 и мельче, и построение цифровых моделей местности (ЦММ). В работе приведен обзор основных алгоритмов оценки линейного разрешения на местности по снимку, без использования мир. Разработана методика проведения оценки ЛРМ. Проведены экспериментальные оценки ЛРМ по космическим снимкам нескольких алгоритмов. По результатам экспериментальной оценки сформулированы рекомендации по использованию методик и алгоритмов оценки ЛРМ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), линейное разрешение на местности (ЛРМ), «резкий край», полная ширина на половине высоты (FWFH).

Введение

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) и линейное разрешение на местности (ЛРМ) являются важными параметрами, характеризующими эффективность работы целевой аппаратуры (ЦА) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Ценность ЧКХ заключается в том, что она напрямую отражает качество работы системы формирования изображения. В связи с тем, что при запуске КА ДЗЗ его целевая аппаратура подвергается воздействию перегрузок, особенно важно контролировать значение ЧКХ регистрируемых им изображений после его вывода на орбиту. Фактическое значение частотно-контрастной характеристики оказывает непосредственное влияние на изыскания и исследования, проводимые с применением материалов ДЗЗ [13]. В свою очередь ЛРМ оценивается на основе частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) ЦА.

В работе рассмотрены несколько основных методов оценки ЧКХ и ЛРМ. Разработана методика оценки и сопоставления различных методов, требования к искусственным тест-объектам и требования к фрагментам изображений для выполнения оценок ЛРМ. Также представлены экспериментальные результаты сравнения различных методов и даны рекомендации по выбору и применению данных методов.

В существующей литературе понятие функции передачи модуляции (ФПМ) превалирует над понятием частотно-контрастной характеристики по ГОСТ 21815.18-90 [4]. Тем не менее, это не совсем верно. Само понятие ФПМ является результатом грубого перевода советскими специалистами еще в 70-е годы XX века английского понятия Modulation Transfer Function. Само по себе оно трудно для восприятия и не несет в себе такой информативности, как ЧКХ и ее сопутствующий график.

Современные методы оценки эффективности работы ЦА

Существующие методы измерения ЧКХ можно разделить на две категории: прямые и косвенные измерения (рис. 1). При прямом методе, частотно-контрастная характеристика получается путем непосредственного измерения коэффициента передачи контраста объектного пространства и пространства образов, идентифицируемого системой формирования изображения при различных пространственных частотах, с применением синусоидальных и штриховых мир.

Косвенные измерения в основном базируется на применении преобразований Фурье: измеряется отклик системы оптического формирования изображения на ступенчатые или импульсные сигналы, а затем рассчитывается ЧКХ. Данную категорию можно разделить на три метода: метод измерения точечного источника света, метод «резкого края» и импульсный метод. Основа косвенного метода заключается в том, что значение модуля функции рассеяния точки (ФРТ), полученной из изображения, и обработанного путем применения преобразования Фурье, равняется значению частотно-контрастной характеристики системы формирования изображений [13].



Рис. 1. Методы измерения ЛРМ

Отметим, что линейное разрешение снимка на местности (ЛРМ) можно определить как точку пересечения ЧКХ и некоторой пороговой характеристики, наклон которой зависит от уровня шума изображения, заданного контраста и других характеристик съемочной системы [1, 2]. Также ЛРМ может быть получено, если известно значение полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWFH) нормализованной функции рассеивания линии (ФРЛ) [10]. В настоящей работе для определения линейного разрешения использовались значения пространственной частоты на пересечении с горизонтальными порогами уровня контраста [1, 3]: 0,5 – реальная разрешающая способность; 0,2 – пороговая разрешающая способность; 0,1 – предельная разрешающая способность. Использование порога контраста 0,05, представленного как критерий для нахождения ЛРМ в работе [5], нельзя применять для фотометрических исследований, так как он на выходе дает завышенную оценку ЛРМ и применим лишь в оптике. Кроме того, было взято значение уровня контраста на частоте Найквиста, определяемое по формуле:

$$MTF_{NQ} = \frac{1}{2 \cdot GSD},\tag{1}$$

где GSD – геометрическое разрешение.

С учетом пространственной частоты, определяемой по графику ЧКХ на данном уровне, также можно получить значение ЛРМ.

Также существует методика оценки показателей качества исходных материалов аэрокосмических съемок и производной продукции, как в цифровой, так и в аналоговой формах, утвержденная Федеральной службой геодезии и картографии России [7].

Методы измерения ЧКХ изображения. Метод «резкого края»

В данном методе ЧКХ измеряется путем выделения «резкого края» из сформированных изображений естественных и искусственных объектов, находящихся на земной поверхности. Функция рассеивания края (ФРК, в иностранной литературе ESF) рассчитывается как функция от значения, зарегистрированного системой для «резкого края», затем дифференцируется для того, чтобы получить функцию рассеивания линии (ФРЛ, в иностранной литературе LSF), которая в свою очередь через преобразование Фурье возвращает кривую ЧКХ, перпендикулярную к ФРЛ. Метод «резкого края» широко применяется на практике.

Однако, поскольку на расчет ЧКХ могут повлиять целый ряд факторов, необходимо уделить особое внимание правильности подбора кривой аппроксимации «резкого края» и его местоположения.

Область с «резким краем» описывается функцией Хэвисайда. Съемка подобного объекта целевой аппаратурой КА ДЗЗ позволяет получить точную функцию рассеивания края. Производная одномерного профиля ФРК позволяет оценить одномерный поперечный срез профиля ЧКХ в направлении нормали к краю. В качестве подобных объектов могут служить как искусственные (окрашенные или выполненные из темной и светлой брезентовой ткани), так и естественные объекты: поля, автостоянки, переходные участки между землей и антропогенными объектами, водой и шельфовым льдом [8].

На рис. 2 представлен схематичный пример «резкого края». Для точной оценки ЧКХ с помощью данного метода необходимо, чтобы:

 – объект, содержащий «резкий край» должен быть достаточно большим, чтобы из него можно выделить область, не подвергающуюся воздействию окружающих пикселей;

– длина переходного участка L_T , представленного на рис. 2, должна быть больше, чем радиус ширины функции рассеяния точки. По грубым оценкам считается [11], что он равен 3 – 5 размерам пикселя на земной поверхности (GSD). Примечание: в отечественной практике размер пикселя на земной поверхности или расстояние между центрами соседних пикселей на земле также известно как геометрическое разрешение снимка.

Угол края α к направлению профиля ЧКХ, должен быть около 90°. Небольшое отклонение от 90° необходимо, чтобы иметь возможность провести передискретизацию функции рассеивания края. Авторы работы [11] предполагают, что разницу в 8 градусов от 90° нужно считать почти идеальной. Кроме того, разница темной и светлой области, деленная на среднеквадратическое отклонение шума должно быть больше 50.

Ключевые параметры области с «резким краем»:

- дифференциальная яркость ΔL между темной и светлой частями области;
- ширина по направлению профиля ЧКХ исследуемой области, называемая L_W;
- угол ориентации к направлению профиля ЧКХ;
- высота области L_H по нормали к профилю ЧКХ.



Рис. 2. Схематичное представление «резкого края»

Преимущества. Можно сравнительно легко разместить на земной поверхности искусственные объекты, содержащие резкий край и получить надежные результаты.

Недостатки. Объекты земной поверхности, содержащие «резкий край», охватывают анализ ЧКХ лишь в двух направлениях и не могут полностью выявить двухмерные кривые рассеивания точки системы формирования изображения. В случае если подобных объектов нет, данный метод восприимчив к отношению сигнал-шум и контрасту природных объектов, что приводит к неустойчивости получаемой ЧКХ изображения [13].

Импульсный метод

При импульсном методе, на изображениях ДЗЗ выделяются линейные объекты, такие как осевые линии мостов и взлетно-посадочных полос. Они используются для подбора функций рассеивания линии (ФРЛ). Затем происходит их обработка с помощью преобразования Фурье, а значение искомой ЧКХ равно отношению их АЧХ. Также этот метод основан на том факте, что частотно-контрастная характеристика может быть получена путем обработки ФРЛ с помощью преобразования Фурье.

Объект, содержащий импульс, состоит из светлой области, окруженной темными областями (рис. 3). Ключевые параметры области с импульсом:

– дифференциальная яркость \(\Delta L\) между темной и светлой частями области;

- ширина импульса, обозначенная W;

- угол ориентации α к направлению профиля ЧКХ.

Высота области L_H по нормали к профилю ЧКХ. Важность угла ориентации и высоты области в данном методе такая же, как и в методе «резкого края» [8].

Изображение *m*, содержащее область с импульсом, представляет собой набор дискретизированных функций рассеивания линии высот L_H в направлении профиля ЧКХ, свернутый импульсом ширины *W*, обозначенным как π_W .

Преимущества. Данный метод является интуитивно-понятным при выборе объектов исследования, таких как искусственные мосты и шоссе, в меньшей степени подвержен влиянию фонового шума, и более вероятно, приведет к достоверным результатам.

Недостатки. При различных значениях пространственного разрешения ЦА КА Д33, не представляется возможным установить идеальные наземные цели. К тому же нужно много времени, чтобы найти импульс объектов земной поверхности вдоль фиксированного направления [13].



Рис. 3. Схематичное представление области, содержащей импульс

Метод точечного источника света

Для идеальной системы формирования изображения, яркое пятно объектного пространства должно быть зарегистрировано в виде пятна при проецировании в пространство образов (рис. 4). Тем не менее, для реально существующих систем, при переносе изображения из объектного пространства в пространство образов, будет происходит снижение качества, при котором яркое пятно будет изображаться в виде точки. Функция распределения уровня яркости отклика системы на идеальный точечный источник света в объектом пространстве может быть аппроксимирована с помощью функции рассеивания точки (ФРТ, в иностранной литературе PSF), которая затем может быть обработана с помощью преобразования Фурье для получения кривых ЧКХ.

Преимущества. Теоретически, этот метод является наиболее полноценным; он может обнаружить кривые ЧКХ и кривые точек рассеивания в любом направлении; он возвращает действительные двухмерные функции рассеивания точки, и тем самым более точно выявляет возможности датчика формировать изображения объектов земной поверхности.

Недостатки. Данный метод требует наличия точечных источников света на земной поверхности, которые трудно найти [13].



Рис. 4. Определение ЧКХ по методу точечного источника света

Методические основы.

Исследование параметров целевой аппаратуры по методу «резкого края». «Резкий край»: отечественный и зарубежный подход

Поскольку на космических снимках наиболее вероятно обнаружить области, содержащие «резкий край», было решено рассмотреть данный метод для нахождения линейного разрешения на местности.

При изучении отечественной и зарубежной литературы стало понятно, что подходы использования «резкого края» для нахождения ЛРМ в России и за рубежом отличны друг от друга, поэтому для анализа и экспериментальной проверки были взяты подходы, представленные в работах МИИГАиК и университета Сапиенца (Рим, Италия).

Отечественный подход определения параметров ЦА по методу «резкого края»

Для нахождения ЛРМ снимка по данной методике, описанной в работе [1], необходимо иметь начальные параметры ЦА: высоту фотографирования, фокусное расстояние и разрешающую способность съемочной системы. Т. е. линейное разрешение на местности, определяется по формуле:

$$L_{obj} = \frac{H}{2 f f_{res}},\tag{2}$$

где *H* – высота съёмки; *f* – фокусное расстояние сенсора; *f*_{res} – разрешающая способность съёмочной системы.

В свою очередь физическая разрешающая способность съемочной системы f_{res} определяется как произведение максимальной $j_{threshold}$ и граничной пространственной частоты Δf . Максимальная (предельная) пространственная частота находится по графику в точке пересечения кривой ЧКХ и прямой порогового яркостного контраста на уровне 10% (ЧКХ = 0,1). Граничная (пороговая) пространственная частота равна нижней границе спектральной функции, полученной с помощью преобразования Фурье. Однако в ходе исследований стало ясно, что подобный метод определения физической разрешающей способности, работает только для снимков Канопус-В, и не применим для другой космической продукции, например Landsat-8, что методологически не верно. Поэтому мы будем приравнивать разрешающую способность съемочной системы к максимальной пространственной частоте.

Можно выделить следующие этапы в рамках данного подхода:

– На изображении производится выборка нескольких зон (в нашем случае пять: центральная область и по углам снимка). Далее в каждой области необходимо вырезать по несколько фрагментов, содержащих пограничный переход. Размер фрагментов должен быть равен 2ⁿ, при этом показатель степени *n* зависит от пространственного разрешения исследуемого изображения и выбирается с учетом параметров ЦА, посредством которой был получен исследуемый снимок [1].

– Из каждого вырезанного фрагмента выбирается столбец или строка, в зависимости от ориентации пограничного перехода, желательно ближе к середине изображения. Полученное графическое изображение даст профиль пограничного перехода DN(n), представляющий собой функцию рассеивания края.

 Для проведения дальнейшего анализа (преобразования Фурье и анализа полученных спектров) необходимо получить функцию рассеивания линии путём вычисления разности предыдущих и последующих пикселей ФРК.

 Создается пустой спектр, длиною *i*, равный длине реализации преобразования Фурье. В его начало добавляется полученная ФРЛ, а затем обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье. Параллельно задается диапазон пространственных частот, равный половине длины реализации преобразования Фурье + 1 элемент. Дискретность пространственных частот определяется как:

$$Deltaf = \frac{1}{pxl \cdot i},\tag{3}$$

где *i* – длина реализации преобразования Фурье; *pxl* – линейный размер светочувствительного элемента матрицы ЦА.

– Полученный в результате БПФ спектр нормируется по первому (максимальному) значению. Результатом является убывающая функция, изменяющаяся в пределах [0; 1], она представляет частотно-контрастную характеристику изображения.

 Искомая ЧКХ берется по модулю (для избавления от комплексной части) и откладывается на графике относительно раннее рассчитанного диапазона пространственных частот.

Зарубежный подход определения параметров ЦА по методу «резкого края»

После выбора на изображении подходящей области, содержащей «резкий край», вначале алгоритм определяет местоположение края с субпиксельной точностью; предполагая, что выбранные участки края находятся на одной прямой, производится аппроксимация всех узлов края методом наименьших квадратов. Профили края, которые сосредоточены на каждом пикселе края и имеют направление, перпендикулярное к краю, интерполируются кубическими сплайнами. Эти функции усредняются и интерполируются с помощью аналитической функции, чтобы получить эмпирическую функцию рассеивания края (ФРК). Затем ФРК дифференцируются, в результате получается функция рассеивания линии (ФРЛ). Наконец к ФРЛ применяется преобразование Фурье, результат нормализуется и получается искомая ЧКХ [10].

После применения преобразования Фурье, вычисленная ЧКХ масштабируется по оси частот для того, чтобы представить ее в сравнении с частотой Найквиста исследуемого изображения. Кроме того, на основе рассчитанной ФРЛ вычисляется значение полной ширины на половине высоты (FWFH). Индекс этого значения равен размеру пикселя цифрового космического изображения на местности (GSD). Для получения реальной линейной разрешающей способности изображения необходимо умножить полученное значение параметра GSD на эмпирический коэффициент 1,5 ÷ 2 [3]. Важно отметить, что нахождение этого параметра в рамках отечественного подхода приводит к получению неадекватного результата. Впрочем, его умножение на эмпирический коэффициент без привязки к целевой аппаратуре также сомнительно.

Таким образом, можно выделить следующие этапы:

- выбор области, содержащей «резкий край»;

 – распознавание края и его аппроксимация по методу наименьших квадратов кубическим полиномом;

 – линейная аппроксимация полученных новых центров края в каждом профиле и получение субпиксельного края;

- построение перпендикуляров к центрам субпиксельного края в каждом профиле;

 – получение новых профилей вдоль перпендикуляров с интерполированными значениями яркости;

 аппроксимация профилей, полученных на предыдущем этапе, кубическим сплайном; - расчет средней ФРК по полученным на предыдущем этапе профилям и ее ФРЛ;

 – интерполяция полученной ФРК эмпирической сигмоидой и получение интерполированной ФРЛ;

– определение значения полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWFH) из ФРЛ.

Поскольку авторы подхода не приводят сведения о том, как определять ЛРМ, мы применим параметры дискретного спектра и основную формулу из отечественного подхода. Таким образом, при реализации данного подхода должны быть добавлены следующие этапы:

получение комплексного спектра посредством преобразования Фурье;

 – определение частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) исследуемого изображения;

 нормирование его по максимальному значению спектра и построение графика с учетом выбранной пространственной дискретизации;

- расчет значения ЛРМ по формуле из отечественного подхода.

Требования к тест-объектам и фрагментам изображений

«Резкий край» должен иметь небольшой наклон, т. е. быть чуть больше или чуть меньше 90°. Отклонение в 8° считается идеальным [8, 11]. При этом наклон края не имеет значения в отечественном подходе, а применим лишь в зарубежном, изложенном в работе [10].

При выборе фрагментов, содержащих пограничный переход, нужно исходить из следующих соображений: при работе со снимками, полученными с помощью ЦА высокого разрешения (от 3 до 0,5 м), фрагмент изображения должен иметь размерность 16×16 пикселей. Для снимков сверхвысокого разрешения (от 0,1 до 0,5 м), фрагмент с «резким краем» должен быть 8×8 пикселей [1, 10]. Для нашего эксперимента мы будем брать тестовые области размером 16×16 пикселей.

Экспериментальные результаты. Отечественный подход

Были выбраны три реальных «резких края» с космических изображений Канопус-В, представленные на рис. 5. Кроме того, в работе [9] была почерпнута идея о возможности сокращения влияния шумов на искомую ЧКХ, а значит и значение ЛРМ. Автор предположил, что влияние шумов от неоднородностей по обе стороны от резкого края можно довольно легко нивелировать путем простого обрезания (обнуления) значений ФРЛ по обе стороны от пика. На рис. 6 представлены графики ФРЛ с исходными и скорректированными значениями и сопутствующие им графики ЧКХ. Очевидно, что подобный метод действительно может улучшить точность определения ЛРМ. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

	Реальный	Реальный	Реальный	Реальный	Реальный	Реальный
	случай 1 –	случай 1-	случай 2-	случай 2-	случай 3 –	случай 3 –
	Ориг.	Скор.	Ориг.	Скор.	Ориг.	Скор.
	ФРЛ	ФРЛ	ФРЛ	ФРЛ	ФРЛ	ФРЛ
ЧКХ 0,5	5,753 м	5,731 м	3,258 м	3,757 м	2,673 м	3,135 м
ЧКХ _{Найквист}	4,553 м	4,36 м	2,935 м	2,745 м	2,415 м	2,456 м
ЧКХ 0,2	4,331 м	4,208 м	2,895 м	2,631 м	2,377 м	2,381 м
ЧКХ 0,1	3,281 м	3,754 м	2,788 м	2,341 м	-	2,182 м

ЛРМ (в метрах) в различных профилях, взятых в реальных изображениях

Среди реальных изображений «резкого края», наиболее низкое ЛРМ отмечено в реальном случае № 1 – тени от здания. Связано это с неоднородностью значений яркости по обе стороны от края. Напротив, в реальном случае № 3 полученные значения ЛРМ максимально близки к заводским показателям ЦА, что обусловлено особенностями регистрации глубоких водоёмов на панхроматических изображениях, т. е. их большей однородностью. Также нужно отметить, что в подобных случаях важно отсутствие растительности вдоль берега, дабы снизить неоднородность светлой области. Коррекция ФРЛ позволила получить незашумленные графики ЧКХ, а значит и более точные значения ЛРМ. Кроме того, для третьего снимка удалось получить значение ЛРМ при пороговом значении ЧКХ равным 0,1, который является главным критерием определения линейного разрешения.



Рис. 5. Выбор «резких краев» на реальных изображениях. На рис. 9, *а* и 9, *б* представлены пограничные переходы от зданий (реальные случаи № 1 и 2), а на 9, *в* – от антропогенно-го водоема (реальный случай № 3)



Рис. 6. Сравнение зашумленных графиков ФРЛ и ЧКХ с очищенными экземплярами

Зарубежный подход

По аналогии применяем к трем снимкам «Канопус-В» итальянский подход определения ЛРМ. Важно отметить, что авторы данного подхода в своей работе [10] говорили о формировании новых профилей яркостей вдоль перпендикуляров к «резкому краю». Однако о том, каким образом необходимо присваивать значения яркости каждому пикселю, авторы статьи не приводят. Кроме того, с учетом небольшого значения угла наклона края (не более 8 градусов) перпендикуляры не покидают пределы исходных профилей. Поэтому было принято решение брать исходные значения яркости вдоль перпендикуляров. Тем не менее, в дальнейших исследованиях необходимо проверить возможность применения бикубической, а также других видов интерполяции в подобных случаях.

Таблица 2

	к тегоду «резкого края»								
	Реальный	Реальный		Реальный	Реальный		Реальный	Реальный	
	случай 1 –	случай 1 –	Разница	случай 2 –	случай 2 –	Разница	случай 3-	случай 3 –	Разница
	Отече-	Зарубеж-	(%)	Отече-	Зарубеж-	(%)	Отече-	Зарубеж-	(%)
	ственный	ный		ственный	ный		ственный	ный	
ЧКХ 0,5	5,753 м	8,281 м	36,03%	3,258 м	10,361 м	104,31%	2,673 м	10,491 м	118,78%
ЧКХ _{Найквист}	4,553 м	6,159 м	29,98%	2,935 м	7,728 м	89,81 %	2,415 м	7,839 м	105,79%
ЧКХ 0,2	4,331 м	5,944 м	31,4%	2,895 м	7,432 м	87,87%	2,377 м	7,541 м	104,13%
ЧКХ 0,1	3,281 м	3,057 м	7,07%	2,788 м	3,899 м	33,22%	-	3,767 м	_

Сравнение результатов в рамках отечественного и зарубежного подхода к методу (презкого крад).

Результаты применения данного подхода представлены в табл. 2 и сравнены с полученными значениями ЛРМ посредством отечественного подхода (без коррекции ФРЛ). Разница между полученными результатами растет с уменьшением неоднородности тестовых областей. Суть в том, что в отечественном подходе предполагается использование лишь одной строки, которая является наиболее однородной. Напротив, в зарубежном подходе используется вся тестовая область (16 профилей). Их аппроксимация (в контексте работы [10] – двойная), усреднение и интерполяция, на однородных областях ведет к большей потере информации. Кроме того, отсутствие учета оставшихся 15-ти профилей в отечественной методике, также может влиять на итоговый результат.

Также были проведены экспериментальные расчеты линейного разрешения ортотрансформированного панхроматического снимка Landsat-8. Для расчёта линейного разрешения были использованы следующие параметры ЦА: f – фокусное расстояние сенсора = 886 мм; H – высота фотографирования = 705 км; Pxl – линейный размер светочувствительного приемника матрицы = 18 мкм [12].

Данный панхроматический снимок на территорию Волгодонска и окрестностей за 30 июня 2014 года был получен с помощью web-ГИС Land Viewer, а сопутствующие атрибутивные данные – с помощью сервиса EarthExplorer Геологической службы США. Снимок был сделан в надир в 8:00 по Гринвичу при нулевом уровне облачности. Высота Солнца над горизонтом составила 61,41 гр., а азимут Солнца – 141,59 гр. На снимке были определены 5 зон, в пределах которых отбирались области (по одной на зону), содержащие «резкий край», так как известно, что значение линейного разрешения может меняться в пределах снимка и достигать наилучшего значения в центре снимка. Были применены, как зарубежный, так и отечественный подход, причем в последнем использовались исходная и скорректированная ФРЛ. Результаты представлены в табл. 3.

В рамках отечественного подхода на основе 2 из 5 полученных графиков значение ЛРМ удалось получить лишь на уровне ЧКХ 0,5. Для 5 области график не пересек ни один из порогов. Это говорит о том, что крутизна и однородность областей по обе стороны от края имеют решающее значение, а поскольку был взят лишь один профиль на область, то усреднение не представляется возможным. Применение среза шумов в ФРЛ не изменило ситуацию для вышеупомянутых областей, однако позволило приблизить другие полученные значения к значениям ЛРМ, полученным в рамках зарубежного подхода.

Таблица 3

Сравнение результатов расчета ЛРМ на 5 областях ортотрансформированного
панхроматического снимка Landsat-8 с помощью отечественного и зарубежного
подходов в рамках метода «резкого края». Разница подсчитана для обеих ФРЛ. *
обозначены ЛРМ, полученные не на уровне 0,1 ЧКХ. Прочерком обозначены
случаи, когда ни один из порогов так и не был достигнут

			Отечественная методика «резкого края»							
		Область 1	Область 2	Область 3	Область 4	Область 5	Среднее по областям	Минимальное по областям		
	Исходная ФРЛ ¹	15,2 м*	16,191 м	17,58 м	20,554 м [*]	-	17,381 м	15,2 м		
ЛРМ (м)	Обрезанная ФРЛ ²	Ι	17,8 м	17,58 м	20,036 м [*]	-	18,472 м	17,58 м		
		Зарубежная методика «резкого края»								
		15,904 м	19,097 м	19,177 м	20,326 м	15,455 м	17,992 м	15,455 м		
Разница ¹ (%)		4,52%	16,47%	8,69%	1,11%	-	7,6975%	1,11%		
Разница ² (%)		_	7,03%	8,69%	1,43%	_	5,72%	1,43%		

Зарубежный подход лучше себя проявил на всех областях, при этом разница с отечественным подходом не превышала и 10%. Очевидно, что сказывается использование всех профилей в пределах области размером 16 × 16 пикселей. Однако итоговые графики имеют синусоидальные всплески, что говорит о влиянии аппроксимации кубическими полиномами. При этом построение новых профилей на основе яркостей пикселей вдоль перпендикуляров к «резкому краю» не решит данной проблемы, особенно в случае однородных областей. Значение уровня контраста на частоте Найквиста для изображений Landsat-8 составило 0,033, что ниже различимого глазом контраста. Данное значение было получено в одном случае из пяти в отечественном подходе и в трёх случаях из пяти в зарубежном подходе. Тем не менее, на средние значения ЛРМ в обоих подходах это не повлияло.

Также для оценки эффективности отечественного и зарубежного подходов была синтезирована радиальная мира со следующими параметрами: R – полный наблюдаемый на изображении диаметр миры = 250 пикселей; r – диаметр пятна размытия в центре миры = 11 пикселей; d – фактическая длина основания сектора миры = 48,25 пикселей [2, 6]. С учетом размера проекции пикселя на земную поверхность в 2,1 метра,

$$d = 48,25 \cdot 2,1 = 101,325 \,\mathrm{M}.\tag{4}$$

Тогда линейное разрешение миры составит:

$$L = \frac{r}{R}d = 4,46 \,\mathrm{M}.$$
 (5)

На местности диаметр подобной виртуальной миры составил бы 525 м.

Выберем три области, содержащие «резкий край» на изображении и применим к ним отечественный и зарубежный подходы расчета ЛРМ. Результаты представлены в табл. 4. Наименьшая разница с эталоном при отечественном подходе в 3,11% достигнута при уровне модуляции в 20%. Наименьшая разница при зарубежном подходе достигнута при уровне модуляции в 10% и составила 4,01%. Итоговые графики ЧКХ при зарубежном подходе имеют синусоидальные всплески, что свидетельствует о возмущениях и искажениях информации в результате аппроксимации и интерполяции в ходе его выполнения. Кроме того, итоговое значение разрешающей способности приходится брать при последнем вхождении графика в 10%-й порог, в связи с наличием вышеуказанных всплесков. Это характерно как для однородных, так и неоднородных областей, содержащих «резкий край». Напротив, отечественный подход прекрасно показывает себя на однородных областях. В случае неоднородных областей, необходимо выполнять коррекцию ФРЛ перед построением графика ЧКХ и брать значение разрешающей способности на уровне модуляции 0,5. Также нужно отметить, что отечественный метод имеет слабую чувствительность к смещению «резкого края» в пределах выбранной области (область 1 – строго по центру, область 2 и 3 - смещены на один пиксель от центра области). Напротив, изменение положения края в пределах области приводит к изменениям в определяемой итоговой ФРЛ в зарубежном подходе, что неминуемо отражается на искомом линейном разрешении.

Также были сгенерированы шесть графиков ЧКХ с известным значением ЛРМ, а затем восстановлены соответствующие им профили, содержащие «резкий край». К ним были применены оба подхода определения линейного разрешения, результаты которого представлены в табл. 5. В пяти из шести случаев удалось восстановить исходный график ЧКХ с СКО в пределах 10% практически на всем протяжении (рис. 7).

Таблица 4

	сиптезированным эталонным тест-объектом (мирои)								
			Отеч	нественный	подход				
ЛРМ (м)	Мира	Область 1	Область 2	Область 3	Среднее	Минимальное	Средняя		
					по областям	по областям	разница (%)		
ЧКХ 0,5			6,6 м		6,6 м	6,6 м	38,48%		
ЧКХ _{Найквист}	4 47 M		4,75 м		4,75 м	4,75 м	6,07%		
ЧКХ 0,2	4,47 M		4,333 м		4,333 м	4,333 м	3,11%		
ЧКХ 0,1			3,611 м		3,611 м	3,611 м	21,25%		
ЛРМ (м)	Мира	Область 1	Область 2	Область 3	Среднее по	Минимальное	Средняя		
					областям	по областям	разница (%)		
ЧКХ 0,5		11,002 м	12,596 м	11,413 м	11,670 м	11,002 м	89,21%		
ЧКХ _{Найквист}	4 47 1	8,243 м	9,492 м	8,518 м	8,751 м	8,243 м	64,76%		
ЧКХ 0,2	4,4/M	7,491 м	9,136 м	8,19 м	8,27 м	7,491 м	59,65%		
ЧКХ 0,1		3,968 м	4,586 м	4,328 м	4,294 м	3,968 м	4,01%		

Сравнение результатов расчета ЛРМ по сравнению с предварительно синтезированным эталонным тест-объектом (мирой)

Таблица 5

Сравнение результатов расчета ЛРМ сгенерированных по графику ЧКХ изображений

	11	По отечествен-	По зарубеж-	Разница с	Разница с	Разница
	Исходное	ному подходу	ному подходу	исходным –	исходным –	между
	(M)	(M)	(M) *	отечественный	зарубежный	подходами
		()	()	(%)	(%)	(%)
ЛРМ изобра-	2 220	2 069	2 747	5.09	16.1	11.04
жения №1	3,228	3,008	2,747	5,08	10,1	11,04
ЛРМ изобра-	2 921	2 (92	2 771	5 27	2.14	2 22
жения №2	2,651	2,085	2,771	3,57	2,14	5,25
ЛРМ изобра-	(150	(252	4.251	1.51	26.65	20.12
жения №3	0,139	0,233	4,231	1,51	30,03	38,12
ЛРМ изобра-	2 400	2,502	4 275	0.12	52.44	52.22
жения №4	2,499	2,302	4,275	0,12	32,44	32,32
ЛРМ изобра-	2 210	2 267**	2 205	2.14	54.92	52.92
жения №5	2,219	2,207	5,895	2,14	54,82	52,85
ЛРМ изобра-	28 404	20.280**	11 209	22.22	96 17	56.02
жения №6	28,404	20,289	11,298	33,33	80,17	30,95

* – на уровне контраста 0,1

** - на уровне контраста 0,5



Рис. 7. Сравнение сгенерированных и восстановленных графиков ЧКХ, по которым в ходе эксперимента проводилось определение ЛРМ

Выводы

Отечественный подход в рамках метода «резкого края» прост в исполнении и может давать адекватное значение искомого ЛРМ в случае правильно выбранной тестовой области. Срез шумов в ФРЛ, описанный в работе [9], также себя оправдывает и позволяет точнее определить линейное разрешение в случае выбора неоднородной области, содержащей «резкий край». Тем не менее, неудачный выбор области и профиля в нем может дать неприемлемый результат. Поэтому необходимо проработать варианты совершенствования подхода, в том числе, учитывая и остальные профили тестовой области. Эксперимент с мирой заданного разрешения показал, что искомое значение ЛРМ нужно определять по уровню контраста, соответствующего частоте Найквиста, а не на других уровнях модуляции, фигурирующих в отечественных работах.

Зарубежный подход определения ЛРМ позволяет получить результат на тех областях, которые оказались неподходящими в отечественном подходе. Однако плохое описание принципа использования профилей яркостей вдоль перпендикуляров к краю, не позволяет в полной мере проверить данный метод в его изначальном исполнении. Одна из ошибок его реализации в настоящей работе заключается в использовании полиномов третьей степени для аппроксимации профилей, а не кубических сплайнов, что смазывало итоговую ФРК и ФРЛ, а значит, влияло на итоговый график ЧКХ и искомое ЛРМ. Также нужно отметить, что при нахождении субпиксельного края лучше использовать небольшой участок профиля, содержащий по два-три пикселя вокруг края, что может повысить точность определения. Помимо прочего, операции аппроксимации и интерполяции профилей накладывают свой отпечаток на итоговый график ЧКХ, а значит и на значение ЛРМ. Необходимо рассмотреть варианты замены аппроксимирующих полиномов третьей степени на вторую для выделения субпиксельного края, а также другие способы получения усредненной ФРК.

Литература

1. Аникеева И. А., Попов С. М. Методика определения передаточных свойств материалов ДЗЗ на основе пространственно-частотных характеристик // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка: Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – 2014. – № 7-1. – С. 144 – 146.

2. Бочарников А. И., Жиличкин А. Г., Коваленко В. П., Кондратов А. В., Тихонычев В. В., Худяков А. В. Технологии определения характеристик целевой аппаратуры КК ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Т. 2. - № 2. – С. 18 – 31.

3. Замшин В. В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 43 – 51.

4. ГОСТ 21815.18–90. Преобразователи электронно-оптические. Метод измерения пространственной частотно-контрастной характеристики. – М., 1991. – 18 с.

5. Методическое пособие по курсу «Техника и технология аэрокосмической съемки» Раздел «Цифровые аэрофотосъемочные системы»: метод. пособие для студентов высших учебных заведений для направления подготовки 23.03.03 / Севастьянова М. Н., Серебряков С. А. – М.: Изд. МИИГАиК, 2015. – 58 с.

6. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Определение разрешающей способности фотоаппарата по наклонным снимкам с использованием радиальных мир // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 53 – 58. 7. Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съемок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме ГКИНП (ОНТА) – 12 – 274 – 03. – М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 36 с.

8. Blanc, P., Wald. L. A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors. Working paper – 2009.

9. Choi, T. IKONOS satellite on orbit modulation transfer function (MTF) measurement using edge and pulse method. Master Thesis. South Dakota State University: Brookings, SD, USA, 2002.

10. Crespi, M., De Vendictis, L. A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment // Sensors. – 2009. – V. 9. – No. 5. – P. 3289 – 3313.

11. Helder, D., Choi, T., Rangaswamy, M. In-flight characterization of the spatial quality of Remote Sensing imaging systems using point spread function estimation. Post-Launch Calibration of Satellite Sensors. On-orbit MTF assessment of satellite cameras. -2004. - V.4 P. 157 - 170.

12. Joseph, G. Building Earth Observation Cameras. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2015. ISBN 978-1-4665-6647-7.

13. Miaozhong Xu, Ming Cong, Huijie Li. Research of on-orbit MTF measurement for the satellite sensors. Proc. SPIE 9158. Remote Sensing of the Environment: 18th National Symposium on Remote Sensing of China. 915809 (May 14, 2014). doi:10.1117/12.2064148.

14. Rangaswamy, M.K. QuickBird II two-dimensional on-orbit modulation transfer function analysis using convex mirror array. Master Thesis. South Dakota State University: Brookings, SD, USA, 2003.

15. Schowengerdt, R.A., Colwell, J.E. Measurement of the HYDICE system MTF from flight imagery // Proceeding of SPIE 2821. – 1996. – P. 127 – 136.

16. Xianbin Li, Xiaoguang Jiang, Chuanjie Zhou, Caixia Gao, Xiaohuan Xi. An analysis of the knife-edge method for on-orbit MTF estimation of optical sensors // International Journal of Remote Sensing. -2010. - V. 31. - Nos. 17 - 18. - P. 4995 - 5010.doi:10.1080/01431161.2010.488254.

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

М. А. Боярчук, В. В. Некрасов

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Аннотация. Приведен обзор алгоритмов оценки отношения сигнал/шум по снимкам со спутников ДЗЗ, описание их работы и необходимые математические выкладки. Рассмотрены как широко известные, классические способы, так и перспективные разработки, в том числе и зарубежные. Разработана и приведена методика сравнения представленных алгоритмов. Разработаны и подробно описаны тестовые материалы, используемые в испытаниях алгоритмов, обоснованы их характеристики. Показаны и проанализированы результаты испытаний алгоритмов на основе тестовых изображений. Кроме того, методы оценки отношения сигнал/шум были также опробованы на реальном изображении со спутника «Канопус-В». На основе проведённых измерений даны рекомендации по выбору и использованию методов для оценки отношения сигнал/шум, выявлены их достоинства, недостатки и важные особенности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), отношение сигнал/шум (С/Ш), оценка качества, сравнение алгоритмов.

Введение

Извлечение полезной информации из спутниковых снимков земной поверхности как правило затруднено из-за наличия шумов различной природы. Для оценки качества данных ДЗЗ и алгоритмов шумоподавления разработана специальная безразмерная мера – отношение сигнал/шум. Цель настоящего исследования заключается в проведении сравнительных испытаний различных методов определения данного отношения.

Обзор алгоритмов

Классический метод определения отношения сигнал/шум (С/Ш) заключается в определении отношения таких статистических показателей изображения, как средняя величина сигнала и среднее квадратическое отклонение (СКО) фона. (1)

$$\frac{CC_{\mu\Gamma Ha\pi}}{\Pi _{YM}} = \frac{\mu_{_{c\mu\Gamma Ha\pi}}}{\sigma_{_{\phi OH}}}.$$
(1)

При этом, для подсчета среднего значения сигнала используется полином второго порядка, аппроксимирующий область снимка. Этот полином вычитается из исходных данных с целью удалить тренды. Среднее значение по изображению находится как разность среднего значения сигнала и фона. По значению фона также вычисляется средний квадратичный шум. Отношение этих двух величин и определяет С/Ш.

$$\frac{CC_{\rm UI} \Gamma_{\rm Han}}{M_{\rm YM}} = \frac{\mu_{\rm curman}}{CK_{\rm mym}}.$$
⁽²⁾

Однако при определении С/Ш таким способом по изображению контрастных объектов значение фона, а, следовательно, и его СКО может быть сдвинуто к 0, что приводит к неадекватному результату. Поэтому для определения С/Ш лучше использовать усовершенствованную формулу (3), в которой СКО шума заменено на СКО сигнала [1]. Данные вычисления необходимо проводить над выбранным вручную однородным участком местности на снимке (так называемый «метод однородной области»).

$$\frac{CCurhan}{UIyM} = \frac{\mu_{curhan}}{\sigma_{curhan}}.$$
(3)

Существуют и другие разновидности формул «классического» метода, например, амплитудное (4) или дисперсионное (5) соотношение С/Ш [2]. Необходимо отметить, что в данных их формулировках указаны СКО и контраст изолированного шума, являющиеся, как правило, неизвестными.

$$\frac{CCurhan}{III vm} = \frac{C_{enrman}}{C},$$
(4)

$$\frac{CC_{\rm UI}}{\rm III}_{\rm YM} = \frac{\sigma_{\rm curran}^2}{\sigma_{\rm IIVM}^2}.$$
(5)

Иногда вместо С/Ш удобно использовать его логарифм, получая при этом значение С/Ш в децибелах. На основе метода однородной области было разработано несколько более сложных алгоритмов, таких как «метод почти однородной области» [3] или методы, разделяющие изображения на окна [4, 5]. Предпосылкой для создания метода «почти однородной области» является необходимость наличия на снимке однородного объекта для использования стандартного метода определения С/Ш. Данный метод позволяет использовать не полностью однородные области для оценки зашумленности изображения. Предложенный алгоритм действует следующим образом: для выбранной области строится спектр излучения, затем для каждого канала рассчитывается СКО, образующее свой спектр. Затем рассчитывается СКО для групп из 2, 4, 5, 8, 10, 16, 20 и 25 пикселей, всего 9 значений СКО на каждый канал. Затем эти значения наносятся на график, на оси абсцисс которого отложены количества пикселей в каждой группе в степени -1/2, а на оси ординат соответствующие значения СКО (рис. 1). Полученная прямая является примерной оценкой зашумлённости изображения. При этом составляющая шума должна предсказуемо уменьшаться. Дисперсия же сигнала должна оставаться примерно неизменной до тех пор, пока размер усредняемой группы не превысит масштаб выбранной зоны [3].

Первый из рассматриваемых методов, использующих разбиение всего изображения на окна, был описан в 1993 году Бо-Кай Гао [5]. Данный метод оценки С/Ш состоит из трёх этапов. На первом этапе изображение разделяется на небольшие блоки размером 4×4 , 5×5 , ... или 8×8 пикселей. Для каждого такого блока вычисляется среднее значение сигнала и локальное СКО.

Однородные области обладают малым СКО и предоставляют информацию о содержании шума на изображении, тогда как неоднородные зоны, содержащие границы и особенности текстуры, имеют высокое СКО. Затем вычисляется среднее значение сигнала для всего изображения и среднее СКО по всем блокам. Второй шаг заключается в создании некоторого количества групп в диапазоне СКО, по которым распределяются блоки. Подсчитывается количество блоков в этих группах.



Рис. 1. Приведенный авторами пример графика, используемого для определения С/Ш методом «почти однородных областей»

Группа с максимальным количеством блоков соответствует среднему шуму изображения, что показано на примерах. Наконец, на 3 м этапе определяется итоговое отношение С/Ш путем деления среднего сигнала изображения на среднее значение шума, определённое на шаге 2. Ошибка определения параметров шума, связанная с группировкой по СКО, оценивается в 2 %. Сходным на первый взгляд образом действует и второй алгоритм, описанный в работе [4] в 2009 году. Изображение делится на участки 3 3 пикселя, и для каждого такого участка вычисляется СКО и среднее значение. При этом весь диапазон значений яркости изображения разбивается на классы, а просчитанные области распределяются по этим классам в зависимости от своего среднего значения. Предполагается, что меньшие значения СКО соответствуют шуму, а большие – изменениям текстуры. Таким образом в каждом классе производится сортировка СКО и за шум принимается среднее из 5 % меньших значений СКО. Зашумленность для класса может быть рассчитана, если в эти 5 % входит достаточно много значений (более 100).

Как видно из приведенных выше описаний, все рассмотренные методы опираются на стандартный метод определения С/Ш и являются его развитием. Совсем по другим принципам устроен геостационарный метод. Данный метод построен на использовании семивариограмм, позволяющих оценить зашумлённость изображения, игнорируя дисперсию пикселей. Семивариограмма строится как срез пронумерованных пикселей, сигнал которых равен z. Отношение между парой пикселей на расстоянии в h пикселей друг от друга может быть определено как дисперсия различий между всеми такими парами. Семивариативность $\gamma(h)$ пикселей на расстоянии h определяется как половина математического ожидания квадрата разности (6):

$$\gamma(h) = 1/2E[z(x_i) - z(x_i + h)]^2.$$
(6)

Срез содержит m пар замеров разности на одинаковом расстоянии. Тогда объективная оценка семивариативности может быть вычислена как (7):

$$\overline{S}^{2} = \left(\frac{1}{2m}\right) \sum_{i=1}^{m} [z(x_{i}) - z(x_{i} + h)]^{2}.$$
(7)

Прежде всего интересны следующие аспекты семивариограмм: порог, т. е. асимптотическая верхняя граница $\gamma(h)$; дисперсия (вариативность) кусков $(C_0) - \gamma(h)$ предел при приближении дистанции к 0; и пространственно зависимое структурное разнообразие. По определению $\gamma(h) = 0$ при h = 0, однако на практике при приближении $h \ge 0 \gamma(h)$ имеет положительное значение, так как дисперсия кусков описывает изменчивость на масштабах менее размера пикселя.

Метод семивариограмм основывается на предположении, что дисперсия кусков является приближением дисперсия пространственно независимых шумов. Данное предположение легко интуитивно принять за верное, так как при предельном значении $\gamma(h)$ при приближении $h \ge 0$ дисперсия кусков не содержит пространственной компоненты и состоит только из случайного шума и внутрипиксельной вариативности. Также оно может быть доказано и математически [8]. Исходя из этого, С/Ш можно найти по формуле (9):

$$SNR \sim \frac{\overline{z}}{\sqrt{C_0}},$$
(9)

где \overline{z} \overline{z} – сигнал, а C_0 – дисперсия кусков. Данные параметры зависят од длины волны, а поэтому С/Ш необходимо вычислять отдельно для каждого спектрального канала.

Использование статистических показателей изображения для расчёта С/Ш имеет очевидный недостаток – сильную зависимость от структуры изображения. В целях исключения влияния текстуры на оценку С/Ш был разработан метод битовых плоскостей [6]. Описываемый алгоритм основан на предположении о том, что распределение шума стационарно в пространстве и не подвержено автокорреляции. Основная идея алгоритма заключается в последовательном извлечении из изображения битовых плоскостей, начиная с менее значимого бита, и определении является ли распределение битов на этой плоскости случайным. Для этого производится подсчёт разницы между значением каждого пиксела и значениями всех соседних пикселей и вычисление распределения этих отличий. Это распределение повергается анализу с целью выяснить было ли оно порождено битовой плоскостью со случайными значениями или с распределением плотности, определяемым некой текстурой.

Анализируя распределение различий между пикселями и их соседями по формулам можно оценить случайность распределения значений на битовой плоскости. В вычислениях участвуют только 4 пространственных направления, так как остальные уже включены в аналогичные вычисления для соседних пикселей.

В случае, если рассматриваемая битовая плоскость НЕ заполнена случайными шумами, то два единственно возможные значения разницы равны 1/2, т. е. переменная подчиняется биномиальному закону распределения с средним значением 1/2. В случае, если на рассматриваемой битовой плоскости преобладает некая текстура, среднее значение разностей между соседними пикселями стремится к значению менее 1/2, что позволяет получить надежный индекс случайности (10)

$$\delta = \frac{1}{2} - \langle \Delta_i(x, y) \rangle. \tag{10}$$

Алгоритм вычисляет переменную δ и сравнивает её значение с ожидаемым СКО. Битовая плоскость отмечается как зашумлённая, есл δ и меньше порога, учитывающего определяемый пользователем коэффициент, влияющий на степень уверенности предсказаний. Стоит отметить, что при принятии за шум значений $\delta \leq 3$ сигма, можно определять зашумлённые плоскости с вероятностью ошибки примерно равной 1 %.

Методические основы

Испытания алгоритмов определения С/Ш проводились на созданных искусственно тестовых изображениях (рис. 2), что позволяет вычислить точные значение статистических характеристик сигнала до воздействия шума. Первое изображение состоит из квадратных блоков по 256 × 256 пикселей со значениями 50 или 150, выстроенных в шахматном порядке. Данные значения выбраны исходя из следующих соображений:

1) Используемые для определения С/Ш области не должны иметь крайних значений (0 или 255), так как данные значения приводят к некорректной оценки сигнала (в случае 0), либо шума (в случае 255).

2) Изображение не должно достигать максимальных значений при добавлении шума с ненулевым математическим ожиданием (в разумных пределах).

Математическое ожидание первого изображения имеет значение 100, его СКО – 50, а дисперсия – 2500. Второе изображение представляет собой градиент, подчиняющийся синусоидальному в тех же пределах. При этом синусоида поднята относительно оси х на 100, задавая таким образом изменение значений сигнала от 50 до 150. Математическое ожидание такого изображения составляет 102,575, а СКО 35,304. Оба тестовых изображения имеют размеры 2048 на 1024 пикселей, что примерно соответствует размерам снимков, производимых съёмочной аппаратурой спутника «Канопус-В».



Рис. 2. Незашумленные тестовые изображения

Приведенные выше изображения были искусственно зашумлены аддитивным гауссовым шумом с различными значениями СКО. Было создано 5 вариантов зашумлённых изображений с СКО равным 1, 3, 5, 8 и 10. В отличие от опытов зарубежных коллег [4, 5], описавших похожие тесты своих алгоритмов, математическое ожидание шума в каждом случае равно не 0, а дисперсии или квадрату СКО. Это связано с тем, что большая часть разновидностей шума (т. е. такие его разновидности, как дробовой, фоновый и шум темнового тока) является результатом пуассоновских процессов, а, следовательно, их среднее значение равно дисперсии [7]. Математическое ожидание шума большее 0 приводит к осветлению изображения (рис. 3). В случае с шумом с СКО = 10, светлые области обоих изображений достигают значения 255, что является максимальным для восьмибитных изображений.



Рис. 3. Тестовое изображение № 1 до и после наложения шума (СКО = 8)

Экспериментальные результаты

Таблииа 1

В качестве эталона для сравнения алгоритмов были использованы результаты вычисления С/Ш по известным заранее точным статистическим характеристикам тестовых изображений и шума. Были проверены несколько способов получения С/Ш: с использованием сигнала из тёмной или светлой однородной области изображения, среднего сигнала по всему изображению, СКО по всему изображению, а также разности сигнала в двух разных однородных областях. Результаты расчёта С/Ш для используемых способов по двум тестовым изображениям приведены в табл. 1.

	По заранее известным характеристикам						
	По тёмной	По светлой	Среднее	СКО изобр	M1-M2		
1	50	200	100	50	100		
3	16,667	66,667	33,333	16,667	33,333		
5	10	40	20	10	20		
8	6,25	25	12,5	6,25	12,5		
10	5	20	10	5	10		
	Тёмный	Светлый	Среднее	СКО изобр	M1-M2		
1	50	200	102,576	35,317	100		
3	16,667	66.667	34,192	11,772	33,333		
5	10	40	20,515	7,063	20		
8	6.25	25	12,822	4,415	12,5		
10	5	20	10,258	3,532	10		

Эталонные значения С/Ш

Как видно из табл. 1, значение С/Ш сильно зависит от уровня сигнала в выбранной для оценки однородной области, а, следовательно, при одних и тех же характеристиках шума значение С/Ш будет выше в светлых областях изображения, что не совсем корректно. Использование СКО изображения и СКО шума затруднено необходимостью изолировать эти параметры. Способ определения С/Ш по двум однородным областям требует такие области найти и всё так же зависит от значений в этих областях. Исходя из приведённых выше соображений, в качестве эталонного значения С/Ш выбраны значения, полученные путём нахождения отношения среднего сигнала по всему изображению к СКО шума на некой однородной области.

Таблица 2

	Метод однородных областей							
	По тёмной	По светлой	Среднее (Т)	Среднее (С)	M1-M2			
1	47,315	144,865	94,667	96,532	95,676			
3	16,747	49,604	33,447	33,045	33,258			
5	9,987	29,777	19,999	19,844	19,994			
8	6,544	18,677	12,883	12,45	12,564			
10	5,142	26,236	10,101	19,584	11,362			
	Тёмный	Светлый	Среднее (Т)	Среднее (С)	M1-M2			
1	47,486	142,874	97,369	97,808	94,96			
3	16,871	50,079	34,514	34,289	33,428			
5	9,869	29,873	20,303	20,455	19,854			
8	6,173	18,217	12,707	12,407	12,34			
10	4,943	26,116	10,172	19,925	11.276			

С/Ш методом однородных плоскостей

Затем были протестированы разные варианты определения С/Ш методом однородной области для зашумлённых тестовых изображений. Результаты приведены в табл. 2.

Следует отметить, что в данной случае вариант с определением С/Ш как отношения среднего сигнала по изображению к СКО шума распадается на два варианта в зависимости от области, по которой находилось СКО шума. Как видно из результатов, выбор области для оценки СКО шума почти не влияет на результат, кроме случая, когда выбранная область является засвеченной, то есть сумма средних значений сигнала и шума больше или равна 255. В данном случае из-за ограничения максимального уровня изображения в 255 происходит неверное определение характеристик шума.

Метод с разделением изображения на окна был протестирован с четырьмя разными размерами окна, рекомендуемыми авторами: 4×4 , 5×5 , 7×7 , 8×8 . По приведённым в табл. З результатам видно, что данный метод имеет большую ошибку при наличии на изображении засвеченных областей (на наших тестовых изображениях такие области появляются при сигме шума, равной 10). Кроме того, при определении количества и ширины групп, на которые делятся окна в зависимости от их СКО, используется эмпирический коэффициент. При этом рекомендуемое автором метода значение этого коэффициента в 1.2 в наших тестах приводило к неадекватному результату и было заменено на 1.5, однако и это число в некоторых случаях приводит к существенной ошибке. Стоит отметить, что несмотря на более низкую (в сравнении с предыдущим методом) точность определения С/Ш, данный метод имеет и некоторые преимущества, например, полную автоматизацию нахождения итогового значения С/Ш.

7	аблииа	3
_		-

	Разбиение на окна							
	4×4	5×5	7×7	8×8	Среднее			
1	113,689	101,492	96,573	117,327	107,27025			
3	36,834	34,76	34,573	42,738	37,22625			
5	23,096	21,824	21,123	26,149	23,048			
8	15,361	14,37	13,176	18,278	15,29625			
10	19,059	19,098	19,679	20,884	19,68			
	4×4	5×5	7×7	8×8	Среднее			
1	93,083	99,051	71,869	93,329	89,333			
3	38,651	36,415	40,817	43,973	39,964			
5	25,34	23,433	24,061	28,941	25,44375			
8	15,064	14,15	18,213	19,066	16,62325			
10	14,3	14,6	13,454	15,46	14,4535			

С/Ш методом разбиения на окна

Наконец был проверен метод битовых плоскостей. Необходимо отметить, что авторы данного метода весьма подробно описали анализ отдельных плоскостей, но при этом не уделили должного внимания получению С/Ш из проведённого анализа, не указав даже каким образом были получены указанные в статье цифры. В результате, нам пришлось самим найти способ определения С/Ш по отделённым плоскостям. Данный способ напоминает метод однородных плоскостей и заключается в следующем – из отделённых друг от друга битовых плоскостей, содержащих полезный сигнал и шум, синтезируются изображения отдельно сигнала и шума. По данным изображениям производится оценка СКО шума и среднего уровня сигнала, из которых можно получить С/Ш. Результаты определения С/Ш подобным образом приведены в табл. 3. По данным из таблицы видно, что данный метод в среднем показал меньшую точность, чем метод с разделением на окна, при этом ему также присуща большая дисперсия. Можно предположить, что данный метод показывает большую точность при большем количестве бит информации на один пиксель изображения. Кроме того, не ясна реакция этого метода на засветку изображения – в первом случае она сопутствует большим ошибкам, во втором - нет.

Таблица 4

	Тест 1	Тест 2
1	81,358	89,601
3	43,699	44,926
5	19,947	21,15
8	10,469	7,683
10	33,934	10,334

С/Ш методом битовых плоскостей

Таблица 5

	<u> </u>	ablicline beex	приведенивих методов	e stationom
	Эталон	Однородн.	Разбиение на окна	Битовые плоскости
1	100	94,667	101,492	81,358
3	33,333	33,447	34,76	43,699
5	20	19,999	21,824	19,947
8	12,5	12,883	14,37	10,469
10	10	10,101	19,098	33,934
1	102,58	97,369	99,051	89,601
3	34,192	34,514	36,415	44,926
5	20,515	20,303	23,433	21,15
8	12,822	12,707	14,15	7,683
10	10,258	10,172	14,6	10,334
	Эталон	Однородн.	Разбиение на окна	Битовые плоскости
1	0,00 %	5,33 %	1,49 %	18,64 %
3	0,00 %	0,34 %	4,28 %	31,10 %
5	0,00 %	0,01 %	9,12 %	0,27 %
8	0,00 %	3,06 %	14,96 %	16,25 %
10	0,00 %	1,01 %	90,98 %	239,34 %
	средн=	1,95 %	7,46 %	61,12 %
1	0,00 %	5,08 %	3,44 %	12,65 %
3	0,00 %	0,94 %	6,50 %	31,39 %
5	0,00 %	1,03 %	14,22 %	3,10 %
8	0,00 %	0,90 %	10,36 %	40,08 %
10	0,00 %	0,84 %	42,33 %	0,74 %
	средн=	1,76 %	8,63 %	17,59 %

Сравнение всех приведенных методов с эталоном

Стоит также отметить, что оценка зашумлённости плоскостей осуществляется посредством сравнения индекса случайности плоскости с порогом – ожидаемым СКО, умноженным на некий эмпирический коэффициент. При этом авторы не приводят примерных значений данного коэффициента. В нашем случае его приемлемое значение оказалось равно ровно 1000. В процессе проведения тестов удалось выяснить пределы индекса случайности – он принимает значения от 0,125 при максимально случайном изображении до ~0,5 для полностью однородной плоскости.

Наряду с автоматическим режимом работы, данный алгоритм обладает ещё одним интересным преимуществом – при обратном синтезе изображения происходит примитивная фильтрация шумов. Результаты проверки всех методов и их сравнение с эталоном представлены в табл. 4.

Оценка С/Ш реального спутникового изображения

Описанные выше методы были также проверены на реальном изображении со спутника «Канопус-В», сделанном в 11:30:28 22 мая 2015 года над городом Волгодонск. По приведённым в табл. 5 результатам видно, что первые два метода дали довольно похожий результат, а метод однородных плоскостей показал значительную ошибку. По всей видимости это связано с тем, что индекс случайности одной из плоскостей был весьма близок к порогу (0,176 при пороге в 0,182). Можно заметить, что разброс результатов, полученных разными методами, по реальному изображению соответствует разбросу результатов по тестовым изображениям, что может послужить косвенным доказательством правильности методики сравнения.

Таблица б

Метод	C/III	%
Однородн. Области	67,272	0,00 %
Разделение на окна	62,157	7,60 %
Битовые плоскости	39,634	41,08 %

Результаты определения С/Ш для реального изображения

Выводы

Из результатов испытаний видно, что наибольшей точностью из рассмотренных методов отличается метод однородной области. Однако он имеет недостатки, которых лишены другие методы: необходимость наличия на изображении однородных областей и необходимость эти области выделить вручную (существуют разработки по автоматическому нахождению однородных областей). Другие рассмотренные методы этих недостатков не имеют, но проигрывают в точности. Исходя из этого можно дать следующие рекомендации по выбору метода оценки С/Ш: в случае, когда необходима максимальная точность и есть возможность обрабатывать изображения вручную, метод однородных плоскостей будет оптимальным выбором. Если же проводить ручную обработку изображений (под обработкой в первую очередь понимается нахождение и выделение однородных областей) не представляется возможным, то лучшим выходом будет применение метода разделения на окна.

Литература

1. Mazzetta, J., Caudle, Dennis; Wageneck Bob (2005). Digital Camera Imaging Evaluation. Electro Optical Industries. p. 8. Retrieved 28 March 2010.

2. Шовенгерд Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Шовенгерд Р. А. – М.: Техносфера. – 2010. – 60 с.

3. Boardman, J. W.; Goetz, A. F. H. Sedimentary facies analysis using imaging spectrometry: A geophysical inverse problem. In Proceedings of the Third AVIRIS Workshop 1991, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA, 1991; JPL Publication: Pasadena, CA, USA, 1991; Pp. 4 – 13.

4. Crespi, M., De Vendictis, L., 2009. A procedure for high resolution satellite imagery quality assessment. Sensors 9, 3289 – 3313.

Gao B.C., 1993, An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers. Remote Sensing of Environment, 43, 23 - 33.

5. Barducci A., Guzzi D., Marcoionni P., and I. Pippi, CHRIS-PROBA performance evalu-

ation: signal-to-noise ratio, instrument efficiency and data quality from acquisitions over San Rossore (Italy) test site" in Proceedings of Third CHRIS/Proba Workshop ESA-SP-593 (European Space Agency, 2005).

6. Замирец О. Н. Влияние случайных шумов в астроизмерительных системах на погрешность ориентации спутников при решении задач дистанционного зондирования Земли / О. Н. Замирец, О. О. Замирец, М. В. Долженко // Технология приборостроения. – 2013. – № 1. – С. 35 – 41. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tp 2013 1 9.

7. Curran, P. J., and Dungan, J. L. (1989), Estimation of signal- to-noise: a new procedure applied to AVIRIS data, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 27:620-628.

КОМБИНИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ДАННЫМИ НАЗЕМНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В ПРОИЗВОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОДУКТАХ

И.Б.Гинзбург, С. Н. Падалко, М. Н. Терентьев

(ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»)

Аннотация. В статье рассматриваются возможности беспроводных сенсорных сетей (БСС), свойства данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), существующие подходы к созданию производных информационных продуктов, полученных с помощью комбинирования данных из различных источников. Приводится пример использования информационного продукта, полученного на основе комбинирования данных БСС и ДЗЗ, для решения задач точного земледелия в части повышения урожайности за счет изменения территориального распределения посевов культур на основе данных о влажности почвы.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, автономные веб-приложения, дистанционное зондирование Земли, точное земледелие, технологии оценки урожайности.

Повышение урожайности сельскохозяйственных культур при одновременном снижении расхода удобрений и искусственного полива возможно при правильном распределении наделов культур на основе данных о влажности почвы. Сложной задачей при этом является получение актуальных данных, поскольку влажность почвы и уровень грунтовых вод меняются во времени в зависимости от разных факторов.

Необходимо проводить многократные измерения влажности почвы, анализ имеющейся статистики измерений, а также выделять и использовать прямую и косвенную информацию о водообеспеченности территории из других источников: сопоставлять статистику урожайности выращиваемых на исследуемых территориях культур, потребностей этих культур в воде, данные о мелиоративных мероприятиях и результаты дистанционного мониторинга индекса зеленой массы.

Для решения этой задачи предлагается использовать возможности беспроводных сенсорных сетей (БСС), свойства данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), существующие подходы к созданию производных информационных продуктов, в том числе полученных с помощью комбинирования данных из различных источников. Далее на примере показано использование информационного продукта, полученного на основе комбинирования данных БСС и ДЗЗ, для решения задач точного земледелия в части повышения урожайности за счет изменения территориального распределения посевов культур на основе данных о влажности почвы.

Рассмотрим по порядку составляющие элементы решения.

Для сбора данных на местности используется беспроводная сенсорная сеть (БСС), которая состоит из однотипных миниатюрных устройств, называемых узлами, обменивающихся между собой информацией по радиоканалу. Узлы имеют в своем составе микроконтроллер, приемник-передатчик, антенну, датчики и источник питания. Задачей БСС является мониторинг обслуживаемого объекта и передача собранной информации в центр обработки данных (ЦОД) [1]. Взаимодействие узлов в сети БСС осуществляется следующим образом [2, 3]. Узлы БСС, выполняющие измерения, передают данные к шлюзу БСС, а шлюз передает данные для обработки ЦОД. Также узлы БСС могут получать от ЦОД команды через шлюзы. Структура сенсорной сети определяется динамически в зависимости доступности узлов и шлюзов – самоорганизующаяся многошлюзовая БСС – это позволяет обеспечивать отказоустойчивую передачу данных измерений в ЦОД и команд узлам БСС.

Датчики узлов БСС способны измерять температуру, влажность, освещенность, уровень вибраций, акустический шум, уровень электромагнитного излучения, радиацию, ускорение вдоль одной или нескольких осей, наклон, уровень жидкости, расход какого-либо ресурса и т. д. Узлы могут быть также снабжены исполнительными устройствами, позволяющими влиять на окружающую среду.

Узлы могут быть простыми и общаться по протоколу ZigBee, или играть роль шлюзов и тогда дополнительно поддерживают протоколы мобильной связи GPRS/EDGE/HSPA/LTE.

Основными требованиями к БСС являются: малая потребляемая мощность, длительное время автономной работы, наличие сенсоров или исполнительных устройств.

Другой необходимой составляющей являются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), получаемые от космических аппаратов. Обычно это прошедшие обработку космические снимки земной поверхности и пространственные метаданные этих снимков, которые представлены в виде базовых продуктов ДЗЗ. Базовые продукты ДЗЗ – информация о различных физических характеристиках наблюдаемых объектов, полученная по различным наблюдательным каналам оптического диапазона и радиолокационного наблюдения.

К характеристикам наблюдаемых объектов относятся дистанционно определяемые геофизические параметры, сопоставимые с данными измерений:

- температуры на различных поверхностях,

- содержание водяного пара или аэрозоля в атмосфере,

светоотражающую способность различных поверхностей

и т. п., а также интегральные характеристики – индексы, получаемые на основе измерений по нескольким каналам:

– различные нормализованные вегетационные индексы (объем биомассы).
 Например, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, англ. – нормализованный относительный индекс растительности – простой количественный показатель объема фотосинтетически активной биомассы),

- «почвенные» индексы (покрытие наблюдаемой поверхности растительностью),

- «снежные и ледовые» индексы (отражающая способность снежного и ледового покрытия) и т. д.

Использование данных ДЗЗ востребовано благодаря возможности получения актуальных объективных данных и охвата больших территорий.

На основе базовых данных ДЗЗ для конечных пользователей формируются производные информационные продукты. С повышением разрешения и расширением возможностей получения данных ДЗЗ все больше потенциальных потребителей могут заинтересоваться производными информационными продуктами, такими как ортофотопланы, ортомозаики, цифровые модели рельефа, 3D-модели местности, тематические схемы и др. пригодные для анализа конечными пользователями без дополнительной обработки.

Производные информационные продукты распространяются с помощью вебприложений для просмотра в стандартных веб-браузерах в различных геоинформационных системах (ГИС) для пользователей стационарных и мобильных клиентских устройств [4], а также в виде файлов и по API для пользователей специализированного программного обеспечения.

Часто пользователям недостаточно одних только данных ДЗЗ. Требуются комбинированные информационные продукты, созданные на основе ДЗЗ и данных, полученных из других источников. Особенно это востребовано в системах мониторинга земной поверхности и ГИС [5].

Комбинирование данных

Данные из существующих баз по интересующей пользователей тематике, графические материалы, полученные различными способами, данные от наземных БСС и т. д. могут комбинироваться в ГИС с данными ДЗЗ. Данные различных источников могут храниться и обрабатываться отдельно и совмещаться в производном информационном продукте на основе привязки к единой системе координат. Данные состоят из информации следующих основных видов: растровой (обработанные данные ДЗЗ, аэрофотосъемки, отсканированные карты), векторной (информация, поступающая от пользователей, БСС), текстовой (описания и числовые характеристики объектов). Для отображения различных видов данных для пользователей в современных ГИС используется многослойная интерактивная карта, в которой данные нескольких источников отображаются в виде комбинации слоев. Слои могут обновляться с различной периодичностью, зависящей от периода актуальности отображаемой информации. Данные всех слоев можно кэшировать раздельно на период их актуальности, что делает возможным создание автономных информационных веб-приложений для различных видов клиентских терминальных устройств, включая мобильные [4, 5].

Возможность независимого изменения и совместного отображения слоев данных позволяет получать свежие текущие данные из наземных источников (например, БСС [6]) для отображения на растровой подложке ДЗЗ. Это позволяет продлить срок полезного использования растровой подложки и обеспечить непрерывную актуальность производного информационного продукта между моментами получения новых обработанных данных ДЗЗ и тем самым значительно расширить круг потенциальных потребителей за счет тех, кому непрерывно требуется актуальная информация.

Комбинирование данных ДЗЗ и БСС

В качестве примера рассмотрим систему мониторинга посевов сельскохозяйственных культур, в которой комбинируются данные ДЗЗ и БСС. Данные ДЗЗ служат в качестве подложки для получаемых в оперативном режиме данных БСС для текущего мониторинга ситуации, а также для оценки урожайности выращиваемых сельскохозяйственных культур на основе NDVI.

На рис. 1 показана структура посевов. Присутствуют злаковые культуры, кормовые травы и овощи. Поля размещены около естественного водоема.

На основе анализа данных ДЗЗ об NDVI выращиваемых сельскохозяйственных культур на рассматриваемых полях и сравнения этих данных с эталонными измерениями NDVI на полях с соответствующими культурами с высокой урожайностью может быть получен производный индекс урожайности для каждой исследуемой сельскохозяйственной культуры для определенного региона.

По данным полученного индекса может быть сделано предположение о том, что неравномерность распределения урожайности исследуемых сельскохозяйственных культур связана с неоптимальным распределением влажности почвы.


Рис. 2. Исходная урожайность

На рис. 2 показано распределение значений индекса урожайности для соответствующих культур в данном регионе.

Для исследования распределения влажности почвы устанавливаются датчики БСС. Используется комплект для построения БСС из 20 устройств: 19 датчиков на полях, 1 датчик используется в качестве приемного узла, подключенного к ПК или сети Интернет. Расстояние между датчиками до 100 м.

Для высокой урожайности сельскохозяйственных культур в период вегетации требуется влажность почвы:

– кормовым травам – 70 – 80 %,

– злаковым культурам – 55 – 60 %,

- овощам - 45-50 %.

На рис. 3 показана схема узлов БСС, измеряющих уровень увлажнения почвы. Синим цветом отмечены узлы, показывающие влажность почвы 70 – 80 % (много влаги вблизи от водоема), желтым – 55 – 60 %, красным – 45 – 50 % (мало влаги вдали от водоема). Как видно из рисунка, с удалением от водоема влажность почвы уменьшается.



Рис. 3. Размещение датчиков БСС на полях для исследования влажности почвы

На двух полях внизу рис. З подбор культур примерно соответствует необходимым уровням увлажнения почвы для обеспечения высокой урожайности выращиваемых культур, а на верхнем поле – из-за неравномерного увлажнения требуется проведение полива или дренирования в зависимости вида от возделываемых культур.

По результатам исследования влажности почвы подтверждается предположение о том, что проблема с урожайностью вызвана неоптимальным распределением влажности.

Для обеспечения оптимальных значений влажности почвы можно применять либо дренаж и полив, что затратно, либо изменить структуру посевов, что и рекомендуется сделать.

После изменения структуры посевов датчики БСС размещаются на полях с обновленной структурой для продолжения мониторинга влажности почвы.

На полях с обновленной структурой посевов влажность почвы соответствует оптимальной для достижения высокой урожайности соответствующих сельскохозяйственных культур.

Это подтверждается данными измерений, полученными с датчиков БСС, что показано на рис. 4.



Рис. 4. Размещение датчиков БСС на полях с обновленной структурой

Если неоптимальное распределение влажности почвы было единственной причиной проблем с урожайностью, то в очередной период вегетации будет получено подтверждение в виде увеличения значений индекса урожайности, полученного на основе анализа данных ДЗЗ об NDVI выращиваемых сельскохозяйственных культур. В противном случае на основе индекса урожайности будут выявлены новые участки проблем, которые можно проанализировать с использованием БСС с другими датчиками.

На рис. 5 показано, как изменилась урожайность полей с обновленной структурой на основе индекса урожайности по данным NDVI.



Результаты измерений БСС при использовании в сельском хозяйстве могут включать в себя: величину солнечной радиации, параметры воздуха (температура, влажность, точка росы, скорость и направление ветра), параметры почвы (температура, влажность, кислотность) и состояние посевов (полученное при помощи датчиков, установленных на высоте 2 – 2,5м и фиксирующих спектр отражённого от посевов света в нескольких фиксированных диапазонах).

По результатам измерений могут быть сформулированы алгоритмы управления исполнительными устройствами с помощью БСС.

Выводы

1. Использование ДЗЗ для оценки урожайности культур позволяет быстро находить проблемные территории для более детального анализа причин падения урожайности.

 Использование БСС с различными датчиками позволяет детально проанализировать причины проблем с урожайностью на выявленных по данным ДЗЗ территориях и выработать план мероприятий по их устранению.

3. Совместное использование ДЗЗ и БСС позволяет быстро принимать обоснованные решения о проведении необходимых сельскохозяйственных работ, а также осуществлять непрерывный и итерационный контроль результатов.

4. На БСС может быть возложена функция управления поливом растений при помощи входящих в состав узлов БСС исполнительных устройств. Также данные, полученные при помощи БСС, могут использоваться при управлении внесением удобрений и гербицидов в почву. Например, узлы БСС могут сообщать пилоту самолёта сельскохозяйственной авиации или системе управления беспилотными летательными аппаратами о необходимости проведения работы на конкретном участке посевов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-01641 А.

Литература

1. Терентьев М. Н. Беспроводные сенсорные сети. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. – 96 с.

2. Падалко С. Н., Терентьев М.Н. Самоорганизация в древовидных персональных беспроводных сетях при наличии нескольких шлюзов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2017. – № 1. – С. 75–85. – DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-75-85.

3. Падалко С. Н., Терентьев М.Н. Автоматизированное проектирование адаптивных дискретных беспроводных сенсорных сетей для космических систем. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 128 с.

4. Гинзбург И. Б., Падалко С. Н. Автономные веб-приложения для систем обработки космической информации [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2015. – № 82. – Режим доступа: http://trudymai.ru/published.php?ID=58832.

5. Гинзбург И.Б. Автономные отказоустойчивые веб-приложения для систем обеспечения доступа к данным дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2015. – №84. – Режим доступа: http://trudymai.ru/published.php?ID=63149.

6. Гинзбург И. Б., Падалко С. Н., Терентьев М. Н. Концепция систем дистанционного мониторинга процессов производства и испытаний аэрокосмической техники на основе многошлюзовой беспроводной сенсорной сети с автономным веб-приложением // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – №4. – С. 58–61.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. А. Золотой, А. В. Урбанович

(Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» НАН Беларуси)

Аннотация. Рассмотрены вопросы автоматизации задачи мониторинга местности по данным дистанционного зондирования Земли. Предложен способ автоматизированного решения задачи, основанный на проецировании растровых изображений космических снимков наблюдаемой местности в векторное пространство. Приведены результаты апробации предложенного способа при сопоставлении космических снимков выделенной территории, полученных на сеансах съемки, выполненных в разное время.

Ключевые слова: мониторинг, дистанционное зондирование Земли, изображение, космический снимок, целевая информация, способ, автоматизация, сопоставление, растр, вектор, проекция, различие, несоответствие.

Введение

Решение задачи мониторинга местности по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обычно сводится к нахождению несоответствий в расположении или других свойствах пространственных объектов, представляемых в виде геометрических примитивов, выделенных из целевой информации (ШИ) космических снимков. На практике задача, как правило, решается визуальным способом с привлечением технологий ручной обработки целевой информации. Визуальный способ сопоставления непрерывно поступающей целевой информации космических снимков является трудозатратным, может включать искажения и неточности, связанные с человеческим фактором. Поэтому привлекательной представляется разработка эффективных подходов к автоматизации решения данной задачи, ограничивающих участие операторов. Анализ содержания доступных источников информации по теме сопоставления цифровых изображений показал, что наиболее эффективные решения в данной области построены на принципах обработки целевой информации в растровом пространстве данных с применением хеш-функций, расстояний Хэмминга [1], вычислений среднеквадратических ошибок [2] и метрик Хаусдорфа для бинаризованных данных [3]. Попытки использовать наработанный опыт других авторов при решении задачи сопоставления цифровых космических снимков выявили невозможность непосредственного применения используемых там подходов без доработки и адаптации. Цифровые космические снимки поверхности Земли в отличие от обычных цифровых изображений, полученных в земных условиях, имеют специфические особенности, образующиеся в результате влияния атмосферы, рельефа местности, вращения и кривизны поверхности Земли, а также других факторов. Это приводит к недопустимому росту ложных срабатываний алгоритмов и не всегда позволяет надёжно выявить изменения целевой информации там, где они встречаются.

Способ автоматизации

Одним из результатов работ НАН Беларуси в области развития технологий тематической обработки космических снимков является разработанный способ автоматизированного сопоставления космических снимков наблюдаемой местности, получаемых с заданной периодичностью. В основу положены принципы сопоставления растровых изображений космических снимков наблюдаемой местности в векторном пространстве данных с последовательным принятием за эталон целевой информации, полученной из первого, а затем из второго изображения. Обязательным условием автоматизации сопоставления космических снимков, является их предварительная обработка до уровня «С» (с ортотрансформацией и геопривязкой). Блок-схема алгоритма, реализующего автоматизированный способ сопоставления космических снимков наблюдаемой местности, показана на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема тематической обработки космических снимков для задачи мониторинга местности

В блоке 1 сопоставляемые космические снимки местности проецируются в общее пиксельное пространство с использованием их RPC-коэффициентов геопривязки. В блоке 2 выполняется векторизация сопоставляемых космических снимков с формированием по каждому космическому снимку соответствующего слоя векторных данных. В блоке 3 осуществляется группировка векторных данных смежных слоёв по критерию близости их взаимного расположения. В блоках 4 и 5 производится поиск несоответствий между слоями векторных данных при последовательном принятии за эталон сначала первого слоя (блок 4), затем второго (блок 5). Векторный слой, который принимается за эталон, далее будет называться «моделью». Векторный слой, сопоставляемый с моделью, будет называться «сценой». Поиск несоответствий

сгруппированных векторных данных из слоев модели и сцены (блоки 4, 5) выполняется только среди векторных групп, сформированных по критерию близости. В блоке 6 производится объединение результатов сопоставления слоёв векторных данных выполненных в блоках 4 и 5, и формируется общий список выявленных несоответствий.

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма формирования векторов несоответствий, появляющихся в результате сопоставления векторных данных модели и сцены.

Несоответствия, выявленные в слоях векторных данных при сопоставлении модели и сцены, должны иметь количественные и пространственные характеристики. Количественной характеристикой выявленного несоответствия является вычисленная степень несоответствия векторных данных. Степень несоответствия нормируется в диапазон от 0 до 1, где 0 соответствует наименьшему, а 1 – наибольшему несоответствию. Степень несоответствия векторов сцены, объединенному с ними вектору модели, нормированная в диапазон от 0 до 1, вычисляется по формуле:

$$A = \max(d, \varphi); \qquad B = \min(d, \varphi);$$
$$N = A + (1 - A)B,$$

где d и ϕ – взаимные расстояния, и взаимные углы векторов сцены и модели, нормированные в диапазон от 0 до 1.

Пространственной характеристикой выявленного несоответствия являются его пиксельные координаты. В векторном пространстве данных первоначально происходит формирование векторных слоёв несоответствий как результатов сопоставления модели и сцены в блоках 4 и 5. Пространственная характеристика выявленного несоответствия задаётся вектором несоответствия, который размещается в векторном слое несоответствий. Для каждого вектора несоответствия вычисляется соответствующая ему степень несоответствия. Координаты крайних точек вектора несоответствия определяют пространственную область выявленного несоответствия. Степень несоответствия, вычисляемая для вектора несоответствия, является одинаковой во всех точках области, задаваемой вектором несоответствия. Получение пиксельных координат объектов векторной графики осуществляется проецированием их на плоскую пиксельную решётку. Данный подход называется растеризацией объектов векторной графики пиксельной маски, представляющей собой однослойную пиксельную матрицу, элементы которой содержат вычисленные значения степеней несоответствия. Алгоритм последовательно обрабатывает все векторы модели и анализирует сгруппированные с ними векторы сцены, вычисляя для каждого вектора сцены степень несоответствия вектору модели, формирует векторы несоответствия вдоль участков вектора модели.

В блоках 1, 2 производится выбор текущего вектора модели и сгруппированных с ним векторов сцены. Вычисляются расстояния и взаимные углы каждого сгруппированного вектора сцены с вектором модели. В блоке 3 выполняется исключение из дальнейшего рассмотрения части векторов сцены, для которых взаимный угол с вектором модели превышает заданный порог ортогональности.

В блоке 4 векторы сцены проецируются на прямую, заданную вектором модели и вычисляются пересечения построенных проекций с вектором модели. В блоке 5 исключаются векторы сцены, проекции которых не имеют пересечений с вектором модели.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма сопоставления векторных данных модели и сцены

Если в результате получается так, что все векторы сцены, сгруппированные с данным вектором модели, оказываются исключены (блок 6), то формируется вектор несоответствия, совпадающий по координатам с вектором модели, имеющий наибольшую степень несоответствия равную 1 и управление передается в блок 1.

Результаты выявления несоответствий векторных данных модели и сцены представляются в виде накладываемой на космические снимки.

Процесс сопоставления векторов сцены с вектором модели для наиболее типичной ситуации проиллюстрирован на рис. 3, где жирной горизонтальной линией отмечен вектор модели, а тонкими сплошными и штриховыми линиями показаны векторы сцены, пронумерованные цифрами от 1 до 6. Серым цветом вокруг вектора модели отмечена выделенная область оценки несоответствий, которая ограничивается порогом допустимой удаленности векторов сцены от вектора модели.



Рис. 3. Определение степени и мест несоответствия векторов сцены объединенному с ним вектору модели

Штриховыми линиями обозначены векторы 5 и 6 сцены, исключаемые на этапе выполнения блоков 2 и 3 алгоритма на рис. 2. Вектор 5 исключается по критерию близости, вектор 6 – по критерию ортогональности. На этапе выполнения блока 5 исключается вектор 3, так как его проекция не имеет пересечений с вектором модели. Проекции векторов 1, 2 и 4 пересекаются с вектором модели, причём проекция вектора 2 полностью ложится на вектор модели.

В блоке 7 на рис. 2 по формуле (1) вычисляются степени несоответствия для векторов сцены, нормированные в диапазон от 0 до 1. В блоке 8 векторы сцены ранжируются в порядке возрастания их степени несоответствия. На рис. 3 условно примем, что после ранжирования неисключённые векторы сцены расположились в порядке 1, 2, 4.

Блоки 9 – 14 алгоритма на рис. 2 реализуют последовательное исключение участков вектора модели, пересекающихся с проекциями векторов сцены в порядке возрастания их степени несоответствия. При этом вдоль каждого исключаемого участка вектора модели создаётся вектор несоответствия со степенью несоответствия того вектора сцены, проекция которого образовала исключаемый участок пересечения.

На рис. 3 участки пересечения проекций векторов сцены с вектором модели обозначены фигурными скобками и имеют одноимённые векторам сцены номера. Первым исключается участок пересечения проекции вектора 1, имеющий наименьшую степень несоответствия. При этом свободная часть вектора модели корректируется. В данном случае уменьшается длина свободной части вектора модели. Формируется вектор несоответствия равный участку пересечения проекции вектора 1 с вектором модели, имеющий степень несоответствия вектора 1. Следующим в порядке возрастания степени несоответствия исключается участок образованный пересечением проекции вектора 2. Формируется вектор несоответствия равный участку пересечения проекции вектора 2, со степенью несоответствия вектора 2. При этом учитывая, что проекция вектора 2 полностью ложится на вектор модели, то исключение участка вектора модели под проекцией вектора 2 приводит к образованию уже двух свободных участков вектора модели – слева и справа от исключаемого участка. Последним на рис. З рассчитываются пересечения проекции вектора 4 с двумя свободными участками вектора модели. С правым свободным участком от проекции вектора 2, проекция вектора 4 не имеет пересечений. С левым свободным участком проекция вектора 4 пересекается и образует исключаемый участок 4. Формируется вектор несоответствия равный участку пересечения проекции вектора 4 с левым свободным участком вектора модели. Степень несоответствия на участке 4 принимается равной степени несоответствия вектора 4. При этом длина левого свободного участка вектора модели корректируется в сторону уменьшения.

В блоке 15 вдоль оставшихся свободных участков вектора модели формируются векторы несоответствия с наибольшей степенью несоответствия, равной 1.

На рис. 4 продемонстрирована работа алгоритмов автоматизированного сопоставления. Работу алгоритмов автоматизированного сопоставления можно продемонстрировать на примере выявления изменений ЦИ на фрагментах изображений двух космических снимков одной и той же местности, полученных в разное время съёмки. В качестве примера выбраны два фрагмента панхроматических космических снимков территории строительства новой кольцевой дороги вокруг г. Минска – МКАД 2, полученные от белорусского космический снимок наблюдаемой местности (рис. 4, a) был получен в феврале 2014 года и на нём отсутствуют признаки строительства автомобильной дороги. Второй космический снимок этой же местности (рис. 4, b) был получен в июне 2015 года и уже имеет четко выраженные признаки строительства нового участка автомобильной дороги. Алгоритмы векторизации снимков были настроены для наилучшего выделения из них плоских протяжённых объектов, не отбрасывающих теней, таких как дороги, реки, мелиоративные каналы и т. п.

На рис. 4 *в*, 4 *г* изображены сопоставляемые фрагменты космических снимков после обработки их алгоритмами векторизации. Зеленым цветом на сопоставляемые фрагменты космических снимков нанесены слои векторных данных, сформированные в результате работы алгоритмов векторизации. На рис. 4, *г* заметен выделенный в результате векторизации участок строительства МКАД-2, который явно отсутствует на рис. 4, *в*.

На рис. 4, ∂ , 4, *е* и на рис. 5 приводятся результаты сопоставления выделенных слоёв векторных данных описанными выше алгоритмами. Различия, выявленные в слоях векторных данных, на рис. 4, ∂ , 4, *е* и на рис. 5 приведены со степенями несоответствия выше порога 0,8. На рис. 4, ∂ приведены результаты выявления несоответствий в слоях векторных данных при принятии за эталон первого векторного слоя. На рис. 4, *е* показаны результаты выявления несоответствий в слоях векторных данных при принятии за эталон второго векторного слоя. Красным цветом на рис. 4, ∂ , 4, *е* обозначены области выявленных несоответствий между слоями векторных данных модели и сцены в виде пиксельной маски растеризованных векторов несоответствия сформированных со значениями степеней несоответствия выше порога 0,8.



Рис. 4. Фрагменты первого и второго космических снимков местности с нанесенными слоями выделенных векторных данных



с порогом степени несоответствия 0,8

На рис. 5 показаны объединенные результаты выявления несоответствий в слоях векторных данных при двух сопоставлениях с последовательным принятием за эталон сначала первого, затем второго слоя векторных данных.

Пиксельная маска векторов несоответствия является однослойной пиксельной матрицей вычисленных значений степени несоответствия. На рис. 4, е и 5 четко выделился строящийся участок автомобильной дороги МКАД 2, отсутствующий на первом снимке и появившийся на втором, что подтверждает состоятельность полученных результатов автоматизированного сопоставления космических снимков.

Заключение

Работа сделана НАН Беларуси в рамках мероприятия научной программы Союзного государства России и Беларуси «Мониторинг-СГ». Разработанный способ автоматизированного сопоставления растровых изображений космических снимков наблюдаемой местности, получаемых с заданной периодичностью, показывает хорошие результаты при выявлении изменений целевой информации. Разработан алгоритм и программная реализация предложенного способа автоматизированного сопоставления цифровых изображений космических снимков для использования в задачах мониторинга местности. Программные средства, реализующие разработанный алгоритм автоматизированного сопоставления растровых космических снимков функционируют в составе аппаратно-программного комплекса анализа и мониторинга космической информации с использованием блочно-параллельной обработки данных.

Литература

1. Перцептуальные хэши для сравнения изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://159.253.18.71/?p=93#content. – Дата обращения: 15.06.2016.

2. Wang Z., Bovik A. Mean Squared Error: Love It or Leave It? // Signal Processing Magazine. – 2009. – V. 26. – № 1. – P. 98 – 117.

3. Huttenlocher D., Klanderman G., Rucklidge W. Comparing Images Using the Hausdorff Distance // Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. $-1993. - V. 15 - N_{\odot} 9. - P. 850 - 863.$

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ БОРТОВОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

В. О. Скрипачев, И. В. Суровцева (МИРЭА)

А. И. Барсуков (Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики») А. О. Жуков (Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ)

Аннотация. Приведены результаты обработки данных бортовой геофизической аппаратуры космических аппаратов (КА) СНАМР и DEMETER для выявления сейсмической активности. Рассмотрены характеристики КА и особенности режимов работы научной аппаратуры. Выполнен анализ измерений параметров ионосферы перед сильными коровыми землетрясениями. Предложена методика обработки бортовых данных и разработан комплекс вычислительных программ. На высотах полета КА выявлены аномальные вариации ионосферных параметров за несколько дней до события. Получено распределение частот появления аномальных ионосферных возмущений.

Ключевые слова: ионосфера, космический аппарат, землетрясение, электронная плотность, ионная плотность, температура электронов, обработка данных, ионосферное возмущение.

Среди опасных природных явлений особенно актуальным является изучение сейсмических катаклизмов и их предвестников. Сейсмическая активность представляет значительную угрозу для населения и инфраструктуры. Только для РФ свыше 25 % ее территории может подвергаться землетрясениям магнитудой 7 баллов и выше.

К настоящему времени накоплен большой эмпирический материал и проведены обширные теоретические исследования физических процессов, сопровождающих подготовку землетрясений на разных стадиях. Природные явления, связанные с сейсмической активностью, проявляются не только в литосфере и атмосфере, но и в ионосфере, где они наблюдаются за несколько часов или дней как до, так и после землетрясения [1].

Применение бортовой научной геофизической аппаратуры позволяет существенно дополнить проводимые измерения в целях обнаружения предвестников сейсмических событий [2, 3]. В настоящей статье рассматриваются возможности мониторинга сейсмической активности с помощью КА на разных высотах, использующих идентичную бортовую аппаратуру. При проведении исследования авторами использовались измерения ионосферных параметров, полученные бортовой аппаратурой КА DEMETER и КА СНАМР.

КА СНАМР находился на орбите высотой ~380 км и наклонением 87,3°, что позволило в течении 10 лет с 15.07.2000 до 19.09.2010 проводить исследования ионосферы почти на всех широтах. В состав бортовой научной аппаратуры КА входил зонд Ленгмюра, с периодичностью 15 с и точностью 10% [4] измерявший электронную плотность в ионосферной плазме. Данные измерений КА СНАМР отбирались авторами с сайта http://gfz-postdam.de. Для изучения явлений, предшествующих землетрясениям и возбуждающих электромагнитные волны в верхней атмосфере, а также для обнаружения электромагнитной эмиссии над сейсмоактивными регионами по заказу Французского космического агентства в период 29.06.2004 по 9.12.2010 на круговой орбите высотой ~ 700 км функционировал КА DEMETER. В составе бортовой научной аппаратуры которого находился зонд Ленгмюра – ISL. Данные КА DEMETER авторами были получены с сайта https://cdpp-archive.cnes.fr.

Для проведения исследований авторами с сайта https://earthquake.usgs.gov также были отобраны 12 землетрясений, с глубиной эпицентра не более 50 км, имеющих магнитуду не менее 7 баллов и произошедших в период, соответствующий активному функционированию КА (табл. 1).

Таблица 1

-			F 4: F 4 -		-)	/
№ /	Название	Дата	Магнитуда	Широта	Долгота	Глубина, км
11/11						КМ
1	Боруджерд, Иран	31.03.2006	6,1	33,50N	48,78E	7
2	Сычуань, Китай	12.05.2008	7,9	31,00N	103,32E	19
3	Острова Самоа	29.09.2009	8,1	15,49S	172,10W	18
4	Аквила, Италия	06.04.2009	6,3	42,33N	13,33E	8
5	Синьцзян, Китай	20.03.2008	7,2	35,49N	81,47E	10
6	П-в Камчатка, Россия	20.04.2006	7,6	60,95N	167,09E	22
7	Курильские о-ва, Россия	15.11.2006	8,3	46,59N	153,27E	10
8	Тайвань	26.12.2006	7,1	21,80N	120,55E	10
9	П-в Минахаса, Индонезия	16.11.2008	7,4	1,27N	122,09E	30
10	О. Хонсю, Япо- ния	19.07.2008	7,0	37,55N	142,21E	22
11	Антофагаста, Чили	14.11.2007	7,7	22,258	69,89W	40
12	Центральное Перу	15.08.2007	8,0	13,398	76,60W	39

Сейсмические события для исследования (M > 6, h < 50 км)

Для учета геомагнитной обстановки выполнялся анализ Кр индексов, предоставляемых сайтом https://omniweb.gsfc.nasa.gov. При этом, значения индексов, использовались в виде Kp*10.

Анализ бортовых данных относительно сейсмического события проводился на интервале наблюдений от – 60 до 10 суток. Таким образом, для каждого события анализировались 71 сутки. За этот период отбирались спутниковые наблюдения и данные о геомагнитной обстановке.

На следующем этапе исследований выполнена предварительная обработка спутниковых данных с учетом размера зоны подготовки землетрясения R, определяемой по формуле Добровольского [5]:

$$R = 10^{0.43M}$$
,

где М – магнитуда.

С учетом рассчитанного радиуса *R* из анализа исключались данные, находящиеся за его пределами. Дальнейшая обработка заключалась в осреднении полученных

значений измеренных параметров: электронной и ионной плотностей, и температуры электронов в зависимости от местного времени (LT). Все данные относящиеся к интервалу от 6 - 18 LT классифицировались как дневные, остальные – ночные.

К систематизированным данным применялась методика, изложенная в [6, 7]: определялась медиана *M*, как наиболее устойчивая характеристика, отражающая среднюю тенденцию и подходящая для ассиметричных распределений; рассчитывалась мера разброса *IQR*:

$$IQR = Q3 - Q1$$
,

где *Q3* – значение третьего квартиля; *Q1* – значение первого квартиля.

Расчет верхних и нижних границ для анализируемых параметров выполнялся по формуле [7]:

$$M \pm k \cdot IQR$$
,

где k = 1,5 - коэффициент, пропорциональный силе землетрясения.

Далее определялись значимые значения исследуемого параметра, т. е. те, которые выходили за верхнюю или нижнюю границу. Для диагностики краткосрочных предвестников целесообразно оценивать данные, полученные за 15 дней до сейсмического события. Для реализации данной методики и визуализации результатов были разработаны вычислительные программы.

На рис. 1 и 2 представлены результаты анализа данных КА DEMETER и КА СНАМР в период подготовки землетрясения, произошедшего в провинции Сычуань (Китай) 12.05.2008 г. с магнитудой M = 7.9. Рис. 1 соответствует данным дневного периода (06 – 18 часов *LT*), а рис. 2 – ночному периоду (18 – 06 часов LT).

На рис. 1, *a*, 1, *б* показано, что по данным КА DEMETER за 9 суток до землетрясения увеличивается электронная и ионная плотность (Ne и Ni), при этом температура электронов (Te) касается, но не превышает рассчитанные границы (рис. 1, *в*). Результаты, полученные по данным КА CHAMP (на низкой орбите) показали, что за 15 суток до землетрясения увеличивается электронная плотность (Ne), превышая рассчитанные границы на -3 сутки. При этом уменьшение Ne по данным КА CHAMP, вероятно, обусловлено как баллистическими особенностями КА, так и режимом работы бортовой аппаратуры. Геомагнитная обстановка в этот период была спокойной (рис. 1, *d*).

На рис. 2, *а* видно, что по данным, полученным КА DEMETER в период 18 – 06 часов LT за 9 сугок до землетрясения значение Ne превысило расчетные границы. В это же время значение Ni возросло, но не превысило границ. После этого роста начался резкий спад значений Ne и Ni, при котором были достигнуты нижние границы. Уменьшение значений Te наблюдалось на – 12 и – 10 сутки (рис. 2, *в*). Вариации значений Ni по данным KA DEMETER (рис. 2, *б*) и Ne по данным KA CHAMP не показали каких-либо ярких проявлений (рис. 2, *г*) и находились в рамках рассчитанных границ.

На рис. 3 и 4 представлены результаты обработки бортовых данных для землетрясения, произошедшего в Перу 15.08.2007 г., имевшего магнитуду *M* = 8,0.

Отметим, что наблюдается рост значений Ne, Ni и Te на -7, -6 сутки в дневное время по данным KA DEMETER (3, *a*, 3, *б*, 3, *в*). Для данных KA CHAMP не выявлено возмущений Ne, однако появляется существенное увеличение на -8, -7 сутки (рис. 3, *d*). Геомагнитная обстановка в этот период была спокойной (рис. 3, *d*).

При обработке ночных данных КА DEMETER получен рост значений Ne и Ni на – 10 и – 9 сутки, а также рост Te на –10 и – 5 сутки. По данным КА CHAMP выявлен постепенный рост Ne, начавшийся на –15 сутки с формированием двух максимумов на – 8, -3 и – 4 сутки.



Рис. 1. Результаты обработки дневных (06 – 18 LT) данных КА DEMETER и КА CHAMP для землетрясения в провинции Сычуань (Китай) 12.05.2008 г.: *а* – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; *б* – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; *в* – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; *г* – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP; *д* – значение геомагнитного индекса Кр*10. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения



Рис. 2. Результаты обработки ночных (18 – 06 LT) данных КА DEMETER и КА CHAMP для землетрясения в провинции Сычуань (Китай) 12.05.2008 г.: *а* – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; *б* – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; *в* – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; *г* – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения



Рис. 3. Результаты обработки дневных (06 – 18 LT) данных КА DEMETER и КА СНАМР для землетрясения в Перу 15.08.2007 г.: *а* – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; *б* – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; *в* – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; *г* – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP; *д* – значение геомагнитного индекса Кр*10. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения



Рис. 4. Результаты обработки ночных (18 – 06 LT) данных КА DEMETER и КА CHAMP для землетрясения в Перу 15.08.2007 г.: а – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; б – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; в – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; г – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения

В табл. 2 приведены номера суток с зафиксированными возмущениями проанализированных параметров. При этом геомагнитные возмущения изучались на более широком интервале (чем от – 15 до 0 суток), чтобы учесть их влияние на состояние ионосферы.

Исходя из этих данных, было построено распределение частот появления аномальных ионосферных возмущений в ионосфере (рис. 5). Как видно на рис. 5 наибольшее появление значимых вариаций наблюдается на -9, -5 и -11 сутки.

Заметно, что наибольшее количество ионосферных возмущений для исследуемых землетрясений наблюдалось в период от – 11 до – 5 суток. При этом сначала доминируют ионосферные возмущения, зафиксированные в дневных измерениях, а затем начинается преобладание в ночных. Также обращает на себя внимание отсутствие возмущений на – 7 сутки.

Таблица 2

№ п/п День /		Ne	Ni	Те	Ne
	Ночь	DEMETER	DEMETER	DEMETER	CHAMP
1	Д				-13
1	Н				-15
2	Д	-9	-9		-8, -3
2	Н	-10		-12, -10	
2	Д	-9, -8, -4	- 9, -8, -4		-2, -1
5	Н	-5, -4	-5, -4	- 10	- 14, - 13
4	Д				-13, -11
4	Н	-3	-3		
-	Д	-11	-11	-11	-14, -11
3	Н		- 11		
6	Д	-9	-9		-6
0	Н			- 6	- 6
7	Д	-6, -5	-6, -5		
/	Н	-5	-5		-5
0	Д	-2	-2		
0	Н	-11	-11	-10	
0	Д		-15		
9	Н	-9	-9		
10	Д			- 5	
10	Н	0		0	
11	Д				
11	Н	-15			
12	Д	6	6	-6	
12	Н	-9	-9	-9, -5	-8, -3

Сутки аномальных ионосферных возмущений по данным КА DEMETER и КА CHAMP



Рис. 5. Распределение частот появления аномальных ионосферных возмущений в ионосфере

Таким образом выполнен совместный анализ данных зондов Ленгмюра бортовой аппаратуры КА DEMETER и КА CHAMP перед сильными коровыми землетрясениями.

Отмечено увеличение электронной концентрации на разных высотах за несколько дней до землетрясений, что, вероятно, обусловлено появлением аномального электрического поля, влияние которого приводит к изменению параметров ионосферы [8]. Указанные возмущения выявлены как для дневных, так и для ночных данных, даже с учетом особенностей режима работы зонда Ленгмюра на борту КА СНАМР, при этом отметим, что мониторинг состояния ионосферы не являлся целевой задачей КА.

Максимальные значения распределения частот появления аномальных ионосферных возмущений в значениях ионосферных параметров на высоте полета КА для исследуемой выборки сейсмических событий приходятся на период от – 11 до – 5 суток до момента землетрясения.

Полученные результаты хорошо согласуются с другими работами, например [7, 9, 10].

Авторы благодарят Centre des Données de la Physique des Plasmas (CDPP) за предоставление данных KA DEMETER, а также GFZ German Research Centre for Geosciencеs за предоставление данных KA CHAMP.

Литература

1. Физика землетрясений и предвестники / Г. А. Соболев, А. В. Пономарев; Отв. ред. В. Н. Страхов. – М.: Наука, 2003. – 270 с.

2. Parrot M. Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects // Adv. Space Res. – 1995. - V. 15. - N 11. - P. 27 - 35.

3. Pulinets S. A. Space technologies for short-term earthquake warning // Adv. Space Res. – 2006. – V. 37. – N 4. – P. 643 – 52.

4. Liu H., Stolle C., Watanabe S. Evaluation of the IRI model using CHAMP observations in polar and equatorial regions // Adv. Space Res. – 2007. – V. 39. – N 5. – P. 904 – 909.

5. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I. and Miachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zone // Pure Appl. Geophys. – 1979. – N 117. - P. 1025 – 1044.

6. Fusion of multi precursors earthquake parameters to estimate the date, magnitude and affected area of the forthcoming powerful earthquakes / Akhoondzadeh M., Saradjian M. K. // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. -2012. -XXXIX-B8. -P. 1-6.

7. Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M. R. 2010 Electron and ion density variations before strong earthquakes (M>6.0) using DEMETER and GPS data // Nat. Hazards and Earth System Sci. -2010. -N 10. -P. 7-18.

8. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation // Journal of Asian Earth Sciences. – 2011. - N 41. - P. 371 - 382.

9. Pulinets S. A., Ouzounov, D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. Physical Bases of the Generation of Short-Term Earthquake Precursors: A Complex Model of Ionization-Induced Geophysical Processes in the Lithosphere – Atmosphere – Ionosphere – Magnetosphere System // Geomagnetism and Aeronomy. – 2015. – V. 55. – N 4. – P. 540 – 558.

10. Zeng Z. C., Zhang B., Fang G. Y., Wang D. F. and Yin H. J. An analysis of ionospheric variations before the Wenchuan earthquake with DEMETER data // Chinese J. Geophys. – 2009. - V.52. - N1. - P.13 - 22.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НАЗЕМНЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА КУБАНСКОМ ПОЛИГОНЕ

В. А. Третьяков, А. А. Ризванов (ФГУП ЦНИИмаш) Р. Ю. Данилов, И. А. Костенко, В. Я. Исмаилов (ФГБНУ ВНИИБЗР)

Аннотация. Определен объем выборки на основе двухвыборочного критерия Фишера. Получено необходимое количество спектральных признаков статистического распознавания двух классов наземных объектов на основе ранга корреляционной матрицы исходных высококоррелированных данных. Определены индексы информативных спектральных каналов путем разбиения спектрального диапазона и расчета матрицы нагрузок. Определено количество обучающих образов на основе феномена Хьюгса. Проведены оценки вероятности ошибки статистического распознавания двух классов наземных объектов с тонкими спектральными различиями на основе найденных параметров.

Ключевые слова: гиперспектральные измерения, коэффициент спектральной яркости (КСЯ), спектральные признаки, статистическое распознавание, вероятность ошибки, обучающая выборка.

Введение

В настоящее время на территории Краснодарского края проводятся обследования производственных посевов основных с.-х. культур на предмет определения развития и распространения основных болезней, вредителей и сорной растительности с помощью гиперспектральных дистанционных методов зондирования. Однако не исследован вопрос распознавания с.-х. культур на ранних стадиях заражения, то есть классов наземных объектов с тонкими спектральными различиями.

В данной работе представлена методика тематической обработки наземных гиперспектральных оптических измерений сельскохозяйственных культур на кубанском полигоне, в основе которой лежат методы статистического распознавания объектов с тонкими спектральными различиями. Признаками распознавания являются коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) наземных объектов, по которым строятся нормальные распределения рассматриваемых классов. Отдельный класс представляет собой набор КСЯ, каждый из которых свернут в одну точку [1]. Предположим, что два выбранных класса здоровой и пораженной бурой ржавчиной пшеницы, являющиеся множеством КСЯ, подчиняются нормальному закону распределения. Тогда определим вероятность ошибки статистического распознавания двух выбранных классов через параметры входных данных, предварительно сформулировав постановку задачи исследования.

Постановка задачи исследования

Пусть на основе анализа процесса функционирования элемента A в составе системы Б, где A-процесс тематической классификации ГС данных, Б – тематическая обработка ГС изображения. Определены:

а – совокупность Х параметров элемента А, где Х – гиперспектральные данные;

б – показатель P_e элемента А; где P_e – вероятность ошибки классификации ;

в — основные внешние и внутренние факторы и параметры W, оказывающие наибольшее влияние на выбранные показатели; где W — объем обучающей выборки v, необходимое количество спектральных каналов n, значения длин волн w

г – система основных ограничений и допущений *D*, принятая при проведении исследований элемента А.

В ходе исследований требуется разработать математическую модель, которая бы позволила:

1. установить связь $P_e = P_e(X, W, D)$ показателя P_e с параметрами X, $(n, v, w) \in W$, при заданных значениях D

2. определить n, v, w при заданных значениях D;

3. оценить значения P_e на основе найденных параметров *n*, *v*, *w*.

Методы решения задачи исследования Шаг 1. Определение объема обучающей выборки v

На данном этапе приведем систему условий *D* оценки нижней границы вероятности ошибки статистического распознавания двух классов объектов со своими многомерными нормальными распределениями яркости по спектральным признакам:

1) отсутствие корреляции спектральных признаков;

2) равенство ковариационных матриц двух рассматриваемых классов;

3) проведение классификации объектов по тестовой выборке.

А. Метод определения объема обучающей выборки v

Из условий независимости спектральных признаков и равенства диагональных ковариационных матриц, описывающих многомерные нормальные распределения яркостей двух классов, следует равенство дисперсий яркостей относительно средних значений каждого спектрального признака для двух классов. Таким образом, отношение несмещенных оценок данных дисперсий будет подчиняться закону Фишера-Снедекора [2]:

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2} \sim \frac{\chi_v^2 / v}{\chi_f^2 / f}$$

где S_{max}^2 и S_{min}^2 – несмещенные оценки дисперсий яркостей относительно средних значений одного признака для каждого класса, χ_{ν}^2 и χ_{f}^2 – случайные величины, имеющие распределение χ^2 с v и f – степенями свободы соответственно, $\nu = n_1 - 1$, $f = n_2 - 1$, где n_1 и n_2 – объем выборки для первого и второго класса соответственно.

По таблице распределения Фишера – Снедекора для заданного уровня значимости α определяется объем выборки.

Далее система ограничений *D* претерпевает пошаговые изменения, в частности, на втором шаге снимается допущение об отсутствии корреляции спектральных каналов.

Шаг 2. Определение количества спектральных признаков *n* с учетом их корреляции

Поскольку на данном шаге мы учитываем корреляцию спектральных каналов, то целью является переход к независимости спектральных признаков в данных каналах. Одним из возможных методов является метод главных компонент и связанное с ним разложение по сингулярным значениям. Количество главных компонент может быть принято за количество новых спектральных признаков в каналах *n*. Однако при переходе из пространства сильнокоррелированных данных в пространство главных компонент количество признаков может быть равно единице. В этом случае можно вычислить ранг корреляционной матрицы исходных данных, который определяет количество независимых строк в матрице. Каждая строка такой матрицы соответствует одному из спектральных каналов. Поскольку каналы находятся в сильной зависимости друг от друга, то определяются наименее зависимые с учетом корреляции каждого канала друг с другом.

Далее используется *SVD*-разложение исходной матрицы по сингулярным значениям, которое состоит в разложении исходной матрицы на матрицу счетов и нагрузок [3].

Построив матрицу нагрузок, выбираются те спектральные каналы, которые обладают наибольшими нагрузками, в количестве равном рангу корреляционной матрицы.

Косвенная оценка вероятности ошибки статистического распознавания двух классов объектов. Оценка вероятности ошибки распознавания на данном шаге проводится по теоретической кривой, полученной в работе [4], с использованием полной дивергенции, в которую входит ковариационная матрица:

$$J = (\mu_1 - \mu_2)^T V^{-1} (\mu_1 - \mu_2), \qquad (1)$$

где μ_I и μ_2 – векторы математических ожиданий для первого и второго класса соответственно, T означает операцию транспонирования, V – ковариационная матрица значений яркости.

Шаг 3. Определение уточненного объема обучающей выборки v с учетом неравенства ковариационных матриц рассматриваемых классов

На следующем шаге мы снимаем наложенное ограничение о равенстве ковариационных матриц классов. Поэтому количество обучающих образов будет увеличиваться в соответствии с феноменом Хьюгса [5], который состоит в необходимости поиска достаточного количества обучающих образов для проведения надежной классификации объектов. Иными словами, отношение количества обучающих образов (объема обучающих выборок) к числу спектральных каналов должно быть минимально необходимым для надежной оценки статистических свойств индивидуальных классов.

Данное отношение может быть оценено в соответствии с диаграммами, описанными в работе Ландгребе [6].

Таким образом, на данном шаге уточняется объем обучающих выборок.

Косвенная оценка вероятности ошибки распознавания двух классов наземных объектов с использованием меры статистической разделимости Джеффриса – Матуситы. После предварительного сбора данных проводится косвенная оценка вероятности ошибки распознавания двух классов наземных объектов (например пораженной и здоровой пшеницы) в соответствии со следующими мерами разделимости двух классов:

Расстояние Джеффриса – Матуситы [7] вычисляется по следующей формуле:

$$JM = (2(1-e^{-\infty}))^{1/2},$$

где *а* – расстояние Бхаттачария

$$\alpha = \frac{1}{8} (\mu_1 - \mu_2)^T \left(\frac{(V_1 + V_2)}{2} \right)^{-1} (\mu_1 - \mu_2) + \frac{1}{2} \ln(\frac{|\frac{(V_1 + V_2)}{2}|}{\sqrt{|V_1| \times |V_2|}}).$$

И на заключительном этапе снимается последнее ограничение, которое заключается в оценке вероятности ошибки распознавания двух классов по тестовой выборке.

Шаг 4. Оценка вероятности ошибки по контрольной выборке

На данном этапе для распознавания двух классов используется контрольная выборка, не участвующая при обучении классификатора образов. На её основе проводится классификация новых наземных объектов по методу максимума правдоподобия и вычисляется вероятность ошибки распознавания двух классов как отношение правильно распознанных спектральных образов к общему объему имеющейся выборки.

Построение классификатора по методу максимума правдоподобия. В качестве метода классификации выбирается метод максимума правдоподобия, как наиболее часто используемый и простой в реализации при решении подобных задач распознавания объектов. В соответствии с выбранным методом дискриминантная функция при распознавании классов по *n* признакам выглядит следующим образом [8]:

$$p(X \mid w_i) = \frac{1}{2\pi^{n/2} |V_i|^{1/2}} e^{-\frac{(X-U_i)^T V_i^{-1}(X-U_i)}{2}}.$$

На основе полученной выборки вычисляются параметры нормальных распределений для первого и второго класса, которые обеспечивают обучение построенного классификатора. Классификация объектов происходит следующим образом: $X \in w_i$, если выполняется

> $p(X|w_i) p(w_i) \ge p(X|w_j) p(w_j)$, – номер класса *w*; $p(w_i)$ – априорная вероятность появления класса.

Математическое моделирование

Для математического моделирования использовались наземные ГС измерения двух классов объектов (здоровой и пораженной бурой ржавчиной пшеницы), полученные на Краснодарском тестовом участке в мае с помощью спектрометра Ocean Optics MAYA 2000-Pro. Полевые измерения приводились к КСЯ, которые стали основой для статистической обработки спектральных характеристик пшеницы в программном пакете MSOffice Exel с помощью стандартной функции f-тест. Последовательность измерений и предварительной обработки подробно описаны в работе [4].

Шаг 1

Для статистической обработки были выделены значения КСЯ в диапазоне от 400 до 1100 нм в 1637 спектральных каналах. В электронных таблицах *Exel* были составлены матрицы КСЯ для первого и второго класса, и средствами пакета анализа данных был применен двух выборочный Фишер-тест в соответствии с приведенными выше формулами, описанными в методе А, для проверки условия равенства ковариационных матриц по объему выборки для каждого класса. Уровень значимости α был выбран по умолчанию 0,05. Объем выборки был выбран одинаковый для обоих классов, т. е. $n_1 = n_2 = v$. В процессе математического моделирования в *Exel* для разного объема выборок определялось наименьшее количество спектральных каналов, в которых не выполняется условие равенства дисперсий для двух классов. В результате была построена зависимость количества спектральных каналов от объема выборки, которая представлена на рис. 1.



Рис. 1. Зависимость количества спектральных каналов *m* от объема выборки *v* (количества наблюдений), в которых не выполняется условие равенства дисперсий в спектральном канале для двух классов

Как видно из рисунка, наименьшее количество спектральных каналов, в которых не выполнено условие, равно 23. Такое значение соответствует количеству наблюдений 31.

Это количество наблюдений *v*, одинаковое для обоих классов, было взято за основу при создании двух обучающих выборок для проведения дальнейшего анализа и определения количества спектральных признаков *n* с учетом сделанных допущений 1 и 2.

Шаг 2

В соответствии с шагом 2 произвольным образом из имеющейся общей выборки был выбран 31 спектр и построена корреляционная матрица (получение общей выборки на основе гиперспектральных измерений здоровой и пораженной пшеницы подробно описано в работе [4]). После вычисления ранга было определено количество спектральных признаков n с учетом их корреляции. Определяя ранг матрицы, было найдено количество независимых строк r = 30 и построена матрица нагрузок средствами *Matlab* R2015*a*.

Таблица 1

3.5					
Матрица	счетов и ня	грузок для	первой	глявной	компоненты
татрица	c iciob n na		псрьон	1 Jun Diron	Kommonentibi

No	Новая коорди-		- / · · · ·	Длина	N⁰		Длина
м <u>о</u> координаты	ната в системе	ного канала	Нагрузка	волны	нового	Нагрузка	волны
1	-6 41122	1	-0.03681	канала 880 95	канала 1	-0.03681	канала 880.95
2	-6.28257	2	-0.03681	881.38	2	-0.03681	882.25
3	-6.17392	3	-0.03681	882.25	3	-0.03681	877.04
4	-6,09196	4	-0,03681	883,55	4	-0,03681	879,21
5	-5,95473	5	-0,03681	877,04	5	-0,03681	881,81
6	-5,80073	6	-0,0368	879,21	6	-0,0368	877,48
7	-5,73733	7	-0,0368	879,64	7	-0,0368	876,61
8	-5,71304	8	-0,0368	880,08	8	-0,0368	884,41
9	-5,71747	9	-0,0368	880,51	9	-0,0368	871,84
10	-5,85532	10	-0,0368	881,81	10	-0,0368	871,4
11	-5,93774	11	-0,0368	882,68	11	-0,0368	884,84
12	-6,12844	12	-0,0368	883,11	12	-0,0368	870,97
13	-6,23883	13	-0,0368	883,98	13	-0,0368	885,71
14	-6,39602	14	-0,0368	877,48	14	-0,0368	870,54
15	-6,41954	15	-0,0368	877,91	15	-0,0368	870,1
16	-6,48395	16	-0,0368	878,34	16	-0,0368	869,67
17	-6,411	17	-0,0368	878,78	17	-0,0368	886,14
18	-6,29858	18	-0,03679	876,61	18	-0,03679	869,23
19	-6,29047	19	-0,03679	884,41	19	- 0,03679	868,37
20	-6,44204	20	-0,03679	871,84	20	-0,03679	886,58
21	-6,57424	21	-0,03679	872,27	21	-0,03679	887,01
22	-6,80571	22	-0,03679	872,71	22	-0,03679	867,93
23	-7,15641	23	-0,03679	873,14	23	-0,03679	867,5
24	-7,42929	24	-0,03679	873,57	24	-0,03679	867,06
25	-7,76063	25	-0,03679	874,01	25	-0,03679	866,2
26	-8,13133	26	-0,03679	874,44	26	-0,03679	888,31
27	-8,47214	27	-0,03679	875,74	27	-0,03679	865,76
28	-8,89622	28	-0,03679	876,18	28	-0,03679	888,74
29	-9,18527	29	-0,03678	871,4	29	-0,03678	863,59
30	-9,27844	30	-0,03678	884,84	30	-0,03678	860,98
31	-9,23518						

В табл. 1 представлен фрагмент матрицы счетов и нагрузок, а также значения длин волн, выбранных в соответствии с отсортированными значениями нагрузок и индексами независимых строк спектральных признаков в каналах.

Из последних трех столбцов табл. 1 видно, что спектральные каналы, обладающие наибольшими нагрузками, находятся в диапазоне длин волн 860 нм – 887 нм. Близкая расположенность этих каналов друг к другу не дает основания утверждать о передаче всей информативности, имеющейся в спектре растительности. Более того, данные спектральные каналы не дают представления об изменении содержания основных химических веществ растительности. Поэтому с целью выбора информативных каналов диапазон 400 – 1120 нм разбивался на отдельные спектральные диапазоны, каждый из которых соответствует своему цвету. Границы таких диапазонов, как правило, размыты, поэтому были выбраны в соответствии со шкалой длин волн, описанной в [9].

Таким образом было получено пять спектральных диапазонов:

450-495 нм (синий цвет);

495 – 570 нм (зеленый цвет);

570 – 620 нм (желтый и оранжевый);

620 - 750 (красный цвет);

750 – 1200 (БИК).

Диапазон 400 – 450 нм был исключен из рассмотрения, поскольку не содержит длин волн, соответствующих изменениям количества каких либо химических веществ в растительности [5].

Аналогично результатам предыдущего анализа, в каждом новом спектральном блоке каналы, обладающие наибольшими нагрузками, близко расположены друг к другу.

Стоит учесть, что общее количество спектральных каналов в соответствии с рангом корреляционной матрицы исходных данных равно 30. Заметим, что в каждом из найденных спектральных диапазонов ранг корреляционной матрицы по-прежнему составляет 30. В связи с этим в каждом спектральном диапазоне будут выделены по 6 спектральных каналов с шагом 5 спектральных каналов. Найденные спектральные каналы *w* занесены в табл. 2:

Таблица 2

â		1	I				
Спектральные	Спектральные каналы (длины волн), нм						
дианазоны, нм							
450 - 495	494,75	492,92	490,62	488,33	486,04	483,74	
495 - 570	555,42	556,78	557,69	559,05	559,96	549,97	
570 - 620	570,39	572,2	574,47	576,73	578,99	581,26	
620 - 750	749,73	747,96	745,75	743,55	741,34	739,13	
750 - 1121	880,95	877,04	881,81	877,91	871,84	874,01	

Информативные каналы в спектральных диапазонах

В табл. 2 в БИК-диапазоне найденные спектральные каналы (выделены курсивом) соответствуют зоне поглощения излучения атмосферой в случае гипотетического рассмотрения гиперспектральных изображений, полученных из космоса. Поэтому при анализе космических гиперспектральных данных, найденные спектральные каналы исключаются. Согласно исследованиям, проведенным зарубежными учеными [5], спектральные каналы с выделенными длинами волн (выделены жирным) содержат информацию о химических веществах, влияющих на изменения в растительности (табл. 3).

Таблица 3

Длина волны, нм	Полезная информация		
490	чувствительность к потере хлорофилла		
550	общее содержание хлорофилла		
575	пигментация, азот		
740	накопление азота		

Информативные спектральные каналы

Определив *n*, *v*, *w*, переходим к оценке вероятности ошибки распознавания двух классов наземных объектов. С этой целью рассчитаем полную дивергенцию с учетом ковариационной матрицы по соотношению (1). По результатам расчетов $J = 7 \cdot 10^3$, что соответствует вероятности ошибки в несколько долей процента.

Мы получили оптимистическую оценку вероятности ошибки распознавания двух классов объектов на основе тестовой выборки при равенстве ковариационных матриц классов объектов и с учетом корреляции в спектральных каналах. По результатам расчета также построена матрица 31 × 30, где 31 – количество наблюдений классов растительных объектов; 30 – количество спектральных каналов.

Шаг 3.

В соответствии с шагом 3 уточняется объем обучающих выборок v.

Таблица 4

				1.1	
	Кол-во обуча- ющих образов	Кол-во спек- тральных при-	Вероятность ошибки $P_{e}, \%$		Метод прямой (косвенной) оцен-
		знаков			ки <i>P</i> _e
Итерация I (учет корреляции в кана- лах)	31	30	0.1		Дивергенция (Рас- стояние Махала- нобиса)
Итерация II (учет неравенства кова- риационных мат- риц классов)	1000	30	1		Расстояние Джеффриса – Матусита
Зарубежные теоретические оценки	1000	30	26		_
Итерация III (учет оценки по контрольной вы- борке)	1000	30	для поражен- ной пшеницы	22	Метод максимума правдоподобия Отношение пра- вильно распо- знанных спектров к общему числу
			для здоровой пшеницы	70	
			Средняя сум- марная веро- ятность ошибки	46	

Результаты отработки разработанных методов

По результатам шага 2 количество спектральных признаков равно 30. В соответствии с диаграммами, описанными в работе Ландгребе, наименьшей вероятности ошибки распознавания можно достичь при объеме выборки m = 500...1000. Очевидно, что при бесконечном объеме выборки точность распознавания наземных объектов может быть увеличена. Исходя из диаграмм Ландгребе, в соответствии с найден-

ным объемом обучающей выборки и количеством спектральных признаков вероятность ошибки распознавания двух классов наземных объектов составляет 26 %.

Далее данное значение проверялось на экспериментальных данных при следующих параметрах входных данных:

- количество обучающих образов (спектров) равно для каждого класса 500;

- количество спектральных признаков равно 30.

Спектры выбирались из всей совокупности полученных экспериментальных данных в соответствии с законом больших чисел случайным образом для наилучшей репрезентативности выборки.

Спектральные признаки выбирались в соответствии с определенными значениями длин волн, полученными на предыдущем шаге математического моделирования.

По результатам работы третьего шага с учетом найденных параметров исходных данных были получены следующие значения мер разделимости:

 Расстояние Бхаттачария
 3,96

 Расстояние Джефриса – Матусита
 1,4

 Вероятность ошибки распознавания двух классов объектов составила
 1,0 %.

В табл. 4 представлены результаты расчета, проведенного на основе разработанных методов определения параметров тематической классификации гиперспектральных данных.

В заключение построим матрицу ошибок для двух классов

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix},$$
 (2)

где P_{11} и P_{22} – вероятности корректного распознавания классов объектов, P_{12} и P_{21} – вероятности неправильного распознавания классов объектов.

Подставляя значения вычисленных вероятностей распознавания двух классов в (2) поличеем: (78% 22%)

(2) получаем: $\begin{pmatrix} 78\% & 22\% \\ 70\% & 30\% \end{pmatrix}$.

Обсуждение

Анализ результатов расчета, представленных в табл. 4, показывает, что косвенная оценка вероятности ошибки распознавания двух классов на основе разработанных подходов и использованных гиперспектральных данных составляет 1 %. В то время как зарубежная оценка – 26 %.

Прямая средняя оценка вероятности ошибки для двух классов достаточно высокая и составляет 46 %. Поэтому необходимо использование дополнительных данных для улучшения точности классификации здоровой и пораженной пшеницы и отработки предлагаемых подходов. В качестве таких данных могут быть использованы гиперспектральные измерения, полученные в КИК диапазоне (до 2,5 мкм).

Выводы

Разработаны подходы к определению необходимых значений параметров тематической классификации классов наземных объектов с тонкими спектральными различиями. В результате отработки разработанных подходов получены следующие значения параметров:

1. Количество обучающих образов равно 1000.

2. Количество спектральных признаков равно 30.

Определены индексы наиболее информативных спектральных каналов с соответствующими значениями длин волн.

Получены оценки вероятности ошибки статистического распознавания здоровой и пораженной пшеницы, которые составляют 70 % и 22 % соответственно.

Целью дальнейших исследований является отработка разработанных подходов и алгоритма классификации на их основе, с использованием гиперспектральных данных КИК диапазона.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-44-230264 р_а.

Литература

1. Третьяков В. А. Тезисы докладов Второй международной научно – технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.:ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. – С. 118 – 125.

2. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. – М.: Государственное издательство физико – математической литературы, 1963. – 500 с.

3. Померанцев А. J. Хемометрика в Excel: учебное пособие. Из – во ТПУ, 2014. – 435 с. 4. Акопов А. К., Баула Г. Г., Кривошеин В. В., Кротков А. Ю., Третьяков В. А. Разработка методики наземных валидационных измерений спектров сельскохозяйственных культур // Журнал «Космонавтика и ракетостроение». – 2015. – Вып. № 6 (85). – С. 45 – 50.

5. Prasad S. Thenkabail, Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation, CRC Press, USA, 2012.

6. David Landgrebe, On Progress Toward Information Extraction Methods for Hyperspectral Data, Presented at the SPIE 42nd Annual Meeting, San Diego C A, 27 July – 1 August 1997.

7. Чабан Л. Н., Учебное пособие. Теория и алгоритмы распознавания образов. – М., 2004. – 70 с.

8. Свейн Ф., Дейвис Ш. Дистанционное зондирование Земли: количественный подход. – М.: Недра, 1983. – 401 с.

9. Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos. Handbook of fundamental Spectroscopic Correlation Charts, CRC Press, 2005.

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДЗЗ И IT

Л. А. Ведешин (Институт космических исследований РАН) А. И. Корнейчук (Управление строительства ФГУП «ЦЭНКИ», филиал КЦ «Восточный») В. И. Семенов (ЗАО «Кибер-С»)

Аннотация. Территориальное планирование можно трактовать как процесс принятия комплексных решений по достижению стратегических целей устойчивого развития территорий во всех сферах жизнедеятельности [1, 2]. Главная иель новых технологий территориального планирования заключается в оптимизаиии проиессов рационального использования всех видов ресурсов. Принятие решений требует грамотного балансирования между позитивными и негативными сторонами тех или иных проектных решений развития территории. Чтобы разработать эту стратегию нужно иметь не только актуальную информацию о состоянии территории, но и обладать научными знаниями (предвидением) о возможных изменениях окружающей среды в процессе развития. Эти изменения могут значительно повлиять на процесс развития промышленности, сельского хозяйства, социальной и культурной жизни людей. Нужную для планирования информацию можно получить по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а новые знания – по результатам интегрированной обработки полученной информации с архивными, картографическими, статистическими и другими источниками, путем моделирования и анализа ситуаиии и возможных изменений в пространстве-времени. Это единственный независимый источник оперативной информации для принятия плановых и проектных решений по рациональному землепользованию и развитию территориальной инфраструктуры (коммуникационных коридоров, инженерных коммуникаций, транспортных путей, водных объектов, 3D-проектов жилых домов и других сооружений). Ключевые слова: дистаниионное зондирование Земли, территориальное планирование, инжиниринг, устойчивое развитие.

Современные информационные технологии (IT), аэрокосмические съемки и экспертные системы должны сыграть большую положительную роль в управлении устойчивым развитием систем – социально-экономических, технических и природных (экосистем, биосистем), так как позволяют автоматизировать управление этими процессами и территорией в целом. Возможно, правильнее перевести этот термин как сбалансированное развитие, так как основные проблемы развития территорий связаны с несбалансированностью, когда при принятии управленческих решений предпочтение отдается одной проблеме в ущерб другой или в ущерб будущему [1, 2]. Чрезвычайно важен и геополитический аспект (стратегия развития общества), который всегда имеет приоритет перед другими проблемами, возникающими в процессе управления. Поэтому понятие «устойчивое развитие» может быть определено как стабильное социально-экономическое сбалансированное развитие, обеспечивающее непрерывный прогресс общества не разрушающий окружающую среду. Эта концепция подразумевает комплексное решение экологических, экономических, социальных, политических и других проблем уже на стадии планирования, контроля и при-

нятия решений с привлечением общественности к этим процессам через Интернет и другие средства массовой информации, тем самым, решая глобальную задачу информатизации общества и его участия в управлении. Реализации принципов широкой информатизации способствует распространение новых информационных технологий. Информированное общество быстрее реагирует на проблемы, в большей степени способно оспаривать традиционный здравый смысл корпоративных и территориальных администраторов, в большей степени способно обсуждать вопросы и готово произвести социальные и геополитические перемены. Например, Интернет позволяет не только получать оперативную информацию из последних публикаций, но и фактографическую – в виде космических изображений любого участка планеты в достаточно крупном масштабе. Наличие современного программного обеспечения по обработке этой информации позволяет осуществлять экспертный анализ изображений и выполнять экологический мониторинг территорий, строить международные информационные сети, обмениваться имеющимися результатами исследований с широкой общественностью. Однако эти технологии требуют достаточно глубоких знаний и большого опыта работ в этой области.

Неравенство в развитии отдельных стран и регионов могут объясняться различием в природных ресурсах, их физико-географическим положением и другими факторами. Поэтому первоочередной задачей управления устойчивым развитием является разработка такой *стратегии развития*, которая учитывала бы не только общие принципы (концепцию) развития, но и уникальные особенности территории (интегральный образ территории) с учетом:

приоритетов территориальной (региональной) самодостаточности;

- исключения деструктивных для развития моделей и методов управления территорией;

- приоритетов местных бизнес-проектов, технологий, производств и ресурсов;

 первоочередности решения насущных проблем, связанных с жизнеобеспечением населения.

Концепция сбалансированности должна включать следующие положения: сохранение целостности экосистем, экономическая целесообразность и социальная справедливость принимаемых решений при обустройстве территории. Из этого следует, что сложность практической реализации этой концепции заключается не только в противоречивости вышеперечисленных положений, но и в наличии стратегической составляющей. Например, стремление максимально учесть природный фактор наталкивается на чисто рыночные отношения и геополитические интересы текущего периода развития общества. Конечная цель концепции не может ограничиваться только экологическими требованиями, отделяя экологию от экономики, так как непонятно за счет каких ресурсов будет развиваться общество.

Смысл концепции устойчивого развития территорий состоит в том, чтобы человечество могло жить в гармонии с природой, соблюдая принципы гуманизма и демократии, в стремлении обеспечения равного удовлетворения потребностей в развитии и в качестве жизни, включая качество окружающей среды, уровень жизни, культуры и образования. Это возможно, если будут решены следующие задачи:

 а) произойдет замена существующих технологий на экологически чистые и менее энерго- и ресурсоемкие, а не возобновляемые сырьевые ресурсы заменятся на возобновляемые;

б) снизятся темпы прироста численности человечества, увеличится производительность труда;



Рис. 1. Экспертный анализ экологической ситуации Волгоградской агломерации. Уровни антропогенных нагрузок
в) экологические нарушения все чаще будут оцениваться как экологические преступления;

г) возрастет эффективность государственного управления, а также надгосударственное управление или влияние на жизненные процессы через международные организации и союзы, что обеспечит реализацию перечисленных выше целей и условий, нейтрализуя, таким образом, эгоистические интересы отдельных частных компаний.

Прежде чем принимать какие-либо решения по управлению территориями, строить планы, разрабатывать проекты развития и использования территорий, необходимо иметь обширную базу данных и базу знаний о территории, чтобы понять, что из себя эта территория представляет: сколько здесь проживает населения, чем оно занято, какие природные ресурсы есть и в каком количестве. Кроме количественных показателей, характеризующих территорию, очень важно знать качественные ее характеристики:

- инженерно-геологические условия строительства;

- в каком состоянии находятся лесные массивы;

- как используются пахотные земли и в каком состоянии они находятся;

- в каком состоянии луга и пастбища и какова их продуктивность;

 что представляет собой промышленность территории, насколько она эффективна, какие виды промышленного производства экономически выгодно здесь развивать;

каковы резервы и состояние водоснабжения и энергоснабжения;

 – какая транспортная сеть на территории, каковы ее транспортные связи и состояние, мощность грузопотоков;

экологическая ситуация и чем она вызвана.

Понятно, что без современного информационного обеспечения, основанного в первую очередь на результатах экспертного анализа материалов аэрокосмической съемки, такую задачу ни в масштабах страны, ни в масштабах области (края, республики) решить практически невозможно. Поэтому первоочередная задача управления устойчивым развитием заключается в *актуализации знаний о территории* (состоянии ее природных ресурсов, промышленности, инфраструктуры, сельского хозяйства, экологии, социальной жизни) и разработке методов формализации знаний и их использования для решения задач управления. [3]. Объективность информации обеспечивается путем максимального привлечения фактографической информации путем интегрированной обработки данных дистанционного зондирования Земли, наземных съемок и других данных, рис. 1.

Планирование рационального землепользования

Территориальное планирование рационального землепользования предполагает полное владение ситуацией в области хозяйственной, производственной и экологической деятельности на территории, а также знаниями о том, какие меры необходимо предпринять, чтобы ее улучшить или сохранить при неблагоприятных условиях. Все инженерные решения по рациональному использованию земель начинаются с анализа антропогенного воздействия, рис. 1. и анализа динамики природной среды с выделением устойчивых и неустойчивых состояний ее компонентов. Это необходимое условие обеспечения безопасности жизнедеятельности через оценку рисков и принятие предупредительных мер. Самыми эффективными средствами получения необходимой для этого информации являются космические съемки и методы прогнозного моделирования. При этом необходимо обработать огромный информационный пласт, смоделировань ситуацию с помощью IT и выполнить анализ возможных опасных процессов и явлений с оценкой рисков и затрат на их снижение с помощью экспертных систем. Рассмотрим несколько примеров по анализу ситуаций в области сельского (рис. 2) и лесного (рис. 4) хозяйств с распознаванием опасных процессов и явлений, выявляемых в результате экспертного анализа.

Используя современные информационные технологии (IT), существующие базы данных и системы связи, в первую очередь, необходимо оперативно получить нужные снимки из разных источников и произвести их обработку (рис. 1). Для сельскохозяйственных земель выполняется анализ состояния почвенного покрова, который основан на том, что разные по происхождению и степени вторичных изменений почвы по-разному отражают, поглощают и излучают электромагнитные волны различных зон спектра на космических снимках [4]. Поэтому, каждый природный объект (образ) имеет свои спектрально-яркостные характеристики на фотоснимках, рис. 2. Применяя различные методы экспертного анализа изображений, можно идентифицировать различные почвы (грунты) и определять их характеристики. В зависимости от содержания гумуса, влажности, механического состава, карбонатности, наличия солей, эродированности и других особенностей, почвы могут изображаться на снимках широкой гаммой тонов.

Основным правилом обработки почвы на склоновых поверхностях является распашка территории поперек склонов. Распашка вдоль склонов приводит к быстрому смыву плодородного слоя почвы и к образованию овражно-балочной эрозии. Укрепление склонов лесопосадками, а также обсадка пашен лесокустарниковыми насаждениями значительно сокращают возможности эрозионных процессов. Ежегодно из-за эрозии выбывает из сельскохозяйственного использования 50 – 70 тыс. км² земель, что составляет примерно 3% эксплуатируемых пашен

Совершенствование структуры землепользования базируется на концепции эколого-хозяйственного баланса территории, т. е. сохранения баланса между антропогенной нагрузкой на земли и способностью территории к естественному самоочищению, учитывается экологическое воздействие сельскохозяйственного производства на земельные ресурсы. Характеристики качественных и количественных показателей экологического воздействия аграрного производства на землю можно получить из ландшафтноэкологических фотокарт, составляемых методом картографо-математического моделирования (рис. 1). Определяются агроэкологические характеристики земель (земли незагрязненные и недеградированные, заболоченные, эрозионно опасные, сильнокислые или сильнощелочные и пр.). Особенно важно использовать результаты исследований загрязненных и других деградированных земель на массивах сельскохозяйственных угодий, прежде всего на пашне, где возделывают культуры, продукция которых идет в пищу. При землеустройстве, ориентированном на экологически сбалансированное использование земель, учитывается также степень физической деградации почв, прежде всего переуплотнение, дегумификация (потеря гумуса), антропогенные изменения осушаемых и орошаемых почв и их возможные негативные экологические последствия, воздействие кислотных дождей на почвы, загрязнение водных источников биогенными веществами и различными физическими соединениями. На основе этих данных принимают определенные землеустроительные решения (уточняют внутрихозяйственную специализацию, рассчитывают урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность угодий на перспективу, устанавливают состав, соотношение и размещение угодий, определяют различные мелиоративные и природоохранные мероприятия и пр.).



Анализ использования земель и разработка рекомендаций

- 1. Показаны примеры правильной распашки сельскохозяйственных земель (поперек склонов).
- 2, 3. Едва видимые начальные стадии склоновой поперечной овражно-балочной эрозии по причине неправильной распашки сельскохозяйственных угодий (вдоль склонов). Разработаны рекомендации по исправлению технологии обработки поче.
- Ярко выраженная овражно-балочная эрозия природно-техногенного характера. Разработаны рекомендации по закреплению верхнего слоя почвы на склонах.

5. Государственные лесозащитные полосы. Относятся к лесам первой категории.

Результаты мониторинга. Примеры изменений в состоянии земель за десятилетие:

- Закрепление склонов лесопосадками и кустарниками, а также правильная технология распашки земель предотвращает образование овражно-балочной эрозии.
- Результат не принятых мер по реализации рекомендаций, выданных десять лет назадовражно-балочная эрозия охватила значительную часть сельскохозяйственных угодий.

Рис. 2. «Тихий разрушитель» наземных и водных экосистем, эрозия почв, за которой следует вымыв и перенос плодородного слоя, транспортирование растворенных веществ в водоемы и отложение наносов



Рис. 3. Сарпинские озера. Мониторинг изменений водных экосистем

На рис. 3. показаны природные и антропогенные изменения на примере космосъемки Сарпинских озер [5].

Опасностям, которые несут наибольшие риски (частые пожары, наводнения, ураганы), уделяется повышенное внимание в процессе территориального планирования и Д33. В качестве предупреждающих факторов проявлений опасных явлений или процессов считается фактор стрессового состояния этой территории, региона, города или района. Стрессовая ситуация может формироваться в природной среде и фиксироваться с помощью космического мониторинга. Эпицентры таких стрессовых (кризисных) ситуаций можно определять заранее по статистическим данным (статистический мониторинг), которые обрабатываются с помощью современных информационных технологий (IT) в государственных или территориальных информационных центрах. Космические съемки необходимы не только для оценки опасных процессов и явлений, но и как фактографические документы для принятия мер по их предотвращению.

Резюме

Территория России богата земельными, водными и растительными ресурсами, лесами, отличается обилием минеральных ресурсов и биологическим разнообразием, а также развитой инфраструктурой. Примеры применения инженерных решений для территориального планирования с помощью ДЗЗ и IT многочисленны. Перечислим примеры решения инженерных задач и продукции для планирования территориального развития с использованием ДЗЗ, IT и экспертных систем:

 Обновление мелкомасштабных геоинженерных карт на территорию проектируемого строительства и создание крупномасштабных карт инженерно-геологических структур и природных образований. 2. Динамическое 3-D моделирование изменений на местности (мониторинг изменений) по космическим разновременным снимкам.

3. Картирование опасных процессов и явлений для оценки и управления рисками природного и антропогенного характера.

4. Аэрокосмические съемки уже играют ключевую роль в мониторинге процессов землепользования и прогноза климатических условий.

5. IT используют знания и технологию ДЗЗ для анализа и интерпретации аэрокосмических изображений с целью мониторинга территории, оценки ее ресурсов и изменений окружающей среды. Используются снимки, полученные в оптическом и микроволновом диапазоне.

 Международные инвесторы обосновывают свои рассуждения с использованием информации, полученной с помощью экспертного анализа космических изображений, что позволяет им строить бизнес-стратегию.

Используя IT, системы или модули искусственного интеллекта для распознавания образов, мы пытаемся создать экспертную систему для экологического мониторинга территорий, которая бы заменила экспертов при решении этих задач или облегчила им работу. Таким образом, мы надеемся снизить стоимость геоинженерных изысканий для планирования развития территорий, мониторинга окружающей среды и сделать конечный продукт доступным для многих пользователей.

Литература:

1. Семенов В. И. Баланс интересов – с математической точностью. Интеллектуальная система управления как основа стратегии природопользования на Каспии. Аналитический журнал «Нефтегазовая вертикаль», ноябрь, 2001.

2. Семенов В. И. Эффективность сахалинских проектов – в руках кибернетики // Научно-производственный журнал «Нефть, газ, строительство». – 2002, март. – С. 60 – 65.

3. Ведешин Л. А., Егоров В. В. Управление состоянием природных объектов с; использованием дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. – № 6. – 1986. – С. 113 – 116.

4. Ведешин Л. А.: Международный аэрокосмический! эксперимент «Курск-85» // Исслед. Земли из космоса. – 1986. – № 4. – С. 119 – 120.

5. Кондратьев К. Л., Васильев Л. Н., Ведешин Л. А. и др. Международный комплексный многоуровневый эксперимент «Внутренние • водоемы-87» // Исслед. Земли из космоса. – 1988. – № 3. – С. 119 – 122.

РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ С ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ КА

Т. А. Арефьева, М. С. Саратовских, А. В. Кузнецов (АО «НИИ ТП»)

Аннотация. Гиперспектральная аппаратура (ГСА) особенна тем, что дает возможность фиксировать излучение в очень узких диапазонах, охватывая видимый и ближний инфракрасный (БИК) спектры. Поскольку множественные спектральные портреты одной точки фиксируются ГСА в одно время, то совокупность спектральных портретов местности во множестве узких диапазонов можно представить в виде гиперкуба. Комбинируя различным образом спектральные портреты, появляется возможность производить классификацию как объектов, так и их групп, основанную на различии интенсивности спектральных отражений.

Ключевые слова: гиперспектральная аппаратура, дистанционное зондирование земли, алгоритмы обработки, вегетационные индексы, мониторинг.

На рис. 1 отражено представление данных, получаемых с ГСА.

Рис. 1. Представление данных, получаемых с ГСА

Опорной величиной для анализа данных ДЗЗ является простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы NDVI (обычно называемый вегетационным индексом).

Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова. Данный индекс позволяет определять группы объектов такие как:

- водная поверхность;

- искусственные объекты (дороги, строения и т. п.);
- травяной покров;
- растительный покров (лес различной плотности, кустарники).

Пример расчета нормализованного индекса NDVI представлен на рис. 2.

Слева представлен пример расчета индекса NDVI, справа – для наглядности, цветосинтезированное изображение по тем же данным, по которым рассчитывался вегетационный индекс.



Рис. 2. Пример расчета нормализованного индекса NDVI

На рис. 2 демонстрируется пример обработанной информации, принятой с гиперспектральной аппаратуры. Простой вегетационный индекс (такой как NDVI) даёт представление о густоте лесного покрова на момент съемки данной местности в районе Петропавловки на границе России и Монголии 30 мая 2016 г.

Для классификации объектов уже внутри группы определение относительного содержания хлорофилла в растениях, следует использовать индексы, предполагающие непрерывную шкалу, в отличие от дискретной шкалы NDVI. Такими индексами могут служить различные относительные индексы, например индекс R/G или R/NIR.

На рис. 3 представлен пример расчета относительного индекса R/NIR. Благодаря непрерывной палитре можно оценить относительное содержание хлорофилла двигаясь по шкале от синего (низкий уровень или отсутствие) к желтому (высокое содержание). Также можно определить объекты антропогенного характера.

При достаточной периодичности съемки описанный анализ при помощи вегетационных индексов способен давать высокоточную оценку при проведении мониторинга сельскохозяйственных земель, лесов, зон затоплений и остаточных подтоплений.

Таким образом, если комбинировать значения интенсивностей для каждого фрагмента изображения в различных спектральных диапазонах становится возможным:

 производить мониторинг сельскохозяйственных территорий и отслеживать эффективность посевов;



Рис. 3. Пример расчета относительного индекса R/NIR

- определять зоны подтопления;

- производить мониторинг состояния лесов;

 отслеживать динамику торфяных пожаров и зоны потенциальных очагов разгорания;

 отслеживать степень загрязнения воды, состояние водной прибрежной флоры и планктона;

- следить за степенью засоленности почв и многое другое.

В программе комплексного анализа информации гиперспектральной и мультиспектральной аппаратуры (ПК КАГА), разработанной в рамках программы «Мониторинг – Союзные Государства» реализован расчет 17 вегетативных индексов, что обеспечивает решение задач комплексного анализа не зависимо от сферы применения. Указанный задел предполагается использовать для создания соответствующих сервисов обеспечения потребителей информацией ДЗЗ в Единой территориально-распределенной информационной системе дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ).

Кроме этого надо отметить, что проведенные посредством ПК КАГА исследования показали – одним из востребованных направлений применения данных ГСА может являться также обеспечение определения контуров облачности на изображениях, получаемых оптико-электронной аппаратурой КА высокого и среднего разрешения. Как пример - использование вегетационных индексов для распознавания облачности по информации, полученной с аппаратуры «Сангур». На рисунке 4 отражены контуры облачности, определенные с помощью алгоритмом расчета вегетационных индексов.

Главная проблема при подобном определении облаком на данных продуктах ДЗЗ – параллакс при регистрировании оптикой КА облаков и разное время записи информации различными оптическими регистраторами, что служит причиной «расползания» контуров облачности в разных диапазонах.



Рис. 4. Контуры облачности, определенные с помощью алгоритмов расчета вегетационных индексов

Вторая проблема определения облаков – недостаток информации при большинстве сеансов съемки данным КА. Поскольку потребителю зачастую интересен только панхроматический диапазон, то один из самых важных диапазонов для расчета вегетационных индексов – ближний инфракрасный, зачастую попросту не снимается.

При достаточном количестве информации возможно произвести оконтуривание облачности с большой точностью. На рис. 5 отражено оконтуривание облаков при помощи расчета вегетационных индексов.

Сверху слева отражено предварительное, справа – окончательное оконтуривание облачности, на картинке снизу – фрагмент исходного изображения в оптическом диапазоне.



Рис. 5. Оконтуривание облаков при помощи расчета вегетационных индексов

На данный момент, несмотря на множество факторов, существенно влияющих на результат анализа продуктов ДЗЗ при помощи вегетационных индексов таких как дефекты радиометрической коррекции, атмосферные явления и т.д., рассмотренный анализ является перспективным направлением для автоматического распознавания различных объектов и явлений, что может служить существенным подспорьем при проведении мониторинга состояния лесов, прогнозирования стихийных бедствий и, как следствие – увеличением эффективности служб природонадзора и МЧС.

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Л. А. Ведешин (Институт космических исследований РАН) А. И. Корнейчук (Управление строительства ФГУП «ЦЭНКИ», филиал КЦ «Восточный») В. И. Семенов (ЗАО «Кибер-С»)

Аннотация. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет планомерно осуществлять пространственный мониторинг различных объектов, явлений и процессов, моделировать различные сиенарии, которые могут иметь некую геополитическую окраску, что позволяет выполнять консалтинговые услуги в сфере геополитики, в военном деле и экономики. «Поскольку спутники предназначены для обнаружения того, что должно быть невидимым, их способность обнаруживать и воспроизводить или «видеть сверху все» придает им особенную мошь» [1]. Но, чтобы извлечь нужную информацию из космических снимков, выполнить анализ геополитической ситуации с целью оповещения заинтересованных лиц и компаний, и найти пути минимизации рисков, нужна специальная экспертная система. В качестве одного из примеров описана экспертная система, созданная для мониторинга загрязнения Каспийского моря, которое омывает и питает биоресурсами и нефтью пять стран. Система, используя данные космического мониторинга, распознает нефтяные загрязнения и, моделируя гидродинамику моря и другие загрязнения, формирует сиенарий развития экологической ситуации в каспийском регионе. Эти сиенарии могут быть использованы для прогноза динамики нефтяных загрязнений из одной акватории в другую. Основываясь на этой информации можно создавать планы по предупреждению ЧС.

Геополитика, в первую очередь, решает главную задачу любого государства – национальную безопасность, одной из главных аспектов которой является создание современной единой системы мониторинга за состоянием и изменениями, происходящих в реальном мире (в пространстве-времени). Информационное обеспечение такой системы осуществляется благодаря наличию разнообразной съемочной аппаратуры (дистанционной, контактной), обеспечивающей в нужный момент времени всей необходимой информацией о текущей ситуации с анализом и визуализацией этой информации для непосредственного использования при принятии решений.

Потеря контроля над пространством одним геополитическим субъектом всегда означает доминирование его другим. Чем больше это пространство, тем сложнее его контролировать. Но регулярное (периодическое) и оперативное (непрерывное) наблюдение для получения достоверной информацией о территории возможно с помощью *кибернетической системы мониторинга*, которая может состоят из:

системы аэрокосмического мониторинга;

 – системы наземного мониторинга опасных природно-техногенных явлений (землетрясений, наводнений);

 система электронной безопасности гидросооружений, инженерных и транспортных коммуникаций, расположенных в зонах повышенного риска;

 – системы наблюдений за величинами оползневого давления на склонах гор, которые ведутся при помощи установленных в несущих конструкциях опор глубокого заложения датчиков давления грунта, а также уровня грунтовых вод в специальных скважинах;

 – системы экспертного анализа результатов наблюдений (мониторинга) и принятия решений.

Современную систему международных отношений формируют процессы взаимодействия субъектов геополитического управления и акторов. В качестве субъектов выступают государства или международные сообщества, на которые распространяется действие норм международного права. Категория «актор» включает все другие сообщества вне зависимости от распространения на них международного права, например, государственные и частные компании, политические движения и их лидеры, неправительственные организации, транснациональные корпорации и др. Субъекты и акторы находятся в определенном *геополитическом пространстве*, в котором взаимодействуют разные государства, рис. 1. В этом геополитическом пространстве могут быть выделены территориальные *поля:*

– эндемические (территории данной национальной общности);

- пограничные (исторически смешанные национальные общности);



– анклавы и другие образования.

Рис. 1. Мониторинг геополитического пространства

Эта структура является основой для формирования геополитической стратегии развития, основная цель которой заключается в следующем:

обеспечение национальной безопасности государства;

- соблюдение национальных (государственных) интересов;

– наращивание национальной мощи и др.

Существуют разные пути (замыслы) достижения этих целей:

экспансия разного типа (военная, экономическая, информационная и др.);

 – агрессия разного типа, включая политику сдерживания с позиции силы, ядерное сдерживание и др.;

 – сохранения баланса сил (соотношение сил) и как варианты – биполярность или многополярность в политике, ядерный паритет и др.;

- цивилизованное (культурологическое) развитие, которая включает и экологию.

Эффективный контроль невозможен без создания системы космического мониторинга за состоянием и изменениями, происходящими на всем геополитическом пространстве-времени. В мире используются самые современные информационные технологии (IT) для оперативной обработки получаемой информации из космоса, экспертные системы распознавания образов и интерпретации изображений, системы искусственного интеллекта (ИИ) для анализа ситуации, прогнозного моделирования и принятия геополитических решений [1 – 3]. Развиваясь и совершенствуясь, такая система космического мониторинга может выполнять функцию кибернетической системы, которая способна не только анализировать геополитическую ситуацию, но и разрабатывать стратегию и меры по ее стабилизации с рассмотрением геополитических, природных, социально-экономических и экологических аспектов, с оценкой рисков и возможных затрат на их снижение. Например, в последние десятилетия стала формироваться новая геополитическая стратегия по отношению к международному терроризму, например, к решению проблемы нераспространения ядерных материалов и наркотиков. В качестве примера решения подобных задач с помощью космического мониторинга и IT приведен фрагмент космического снимка и результатов экспертной оценки процесса добычи стратегических материалов по результатам мониторинга (рис. 2).



Рис. 2. Космический мониторинг и анализ процессов добычи стратегических материалов

Результат экспертного анализа этого снимка – «активная деятельность на данном месторождении не наблюдается».

Система может контролировать наиболее опасные природно-техногенные процессы и явления для своевременного принятия мер к защите всей инфраструктуры транспортных и энергетических систем, которые являются связующим звеном любой экономической системы, хотя они являются наиболее уязвимыми. Это происходит в силу их специфики – большой протяженности, расположения вдали от населенных пунктов и промышленных объектов, высоких скоростей движения. Определив опасные места и источники их воздействия на транспортные и энергетические системы, можно более целенаправленно провести упреждение предполагаемых опасных воздействий, правильно расположить системы наземных видеонаблюдений. На рис. 3 показано решение задачи оптимизации расстановки средств видеонаблюдений за опасными природно-техногенными процессами (лавины, оползни, камнепады) в горной местности путем создания трехмерной ландшафтной модели, созданной с помощью космических снимков и IT.



Рис. 3. Оптимизация расстановки камеры видео-наблюдения за опасными процессами вдоль автодороги в горной местности с помощью 3D-ландшафтная модель

Эффективность системы распознавания образов зависит от полноты заложенных в базу знаний экспертной системы логических моделей и критериев мер сходства, т. е. обобщенных образов, соответствующих определенному классу объектов. Поэтому важным этапом распознавания является классификация образов или признаков активности (поведения) объектов распознавания с учетом логических связей и особенностей влияния внешней среды. Методология распознавания образов, процессов и явлений базируется на существующих теоретических разработках и опыте практического построения систем распознавания образов.

Современный уровень развития радиоэлектроники позволяет ставить и решать задачи создания новых систем комплексной безопасности особо охраняемых объектов, которые освободили бы операторов, диспетчеров и охраны от рутинных операций слежения (мониторинга), оценки внешней обстановки и принятия решений. На рис. 4 приведена система космического мониторинга особо охраняемого морского объекта [4].

Система совмещается с независимой системой контроля объемов хранения и расходования нефти (1 – нефтяной терминал; 2 – контроль заполнения нефтью товарного парка, видны незаполненные резервуары, заполненные частично и полностью; 3 – процесс реконструкции старого терминала).



Рис. 4. Система космического мониторинга особо охраняемого объекта (морского нефтеналивного терминала)

На рис. 5 приведен пример работы экспертной системы, созданной для мониторинга загрязнения Каспийского моря, которое омывает и питает биоресурсами и нефтью пять стран. Система, используя данные космического мониторинга, распознает нефтяные загрязнения и, моделируя гидродинамику моря и другие загрязнения, формирует сценарий развития экологической ситуации в каспийском регионе. Эти сценарии могут быть использованы для прогноза динамики нефтяных загрязнений из одной акватории в другую и для оценки влияния загрязнений на биоресурсы. Основываясь на этой информации можно создавать планы по предупреждению экологических катастроф и возможных претензий со стороны соседних стран и всей международной общественности.

Современные требования к решению задач безопасности природных и техногенных объектов в интересах государственных, правоохранительных и коммерческих структур свидетельствует о необходимости применения новых методов управления информационными потоками и интеллектуализации процессов анализа данных и принятия решений. Необходимость интеллектуализации этих процессов связана с резким повышением активности террористических организаций в мире, цель которых дестабилизация обстановки в регионе. С развитием интернет-технологий многие ведущие зарубежные фирмы, специализирующиеся в сфере информационных технологий, ежегодно вкладывают огромные средства в создание соответствующего инструментария для обработки интеллектуальной информации.

Получение в реальном масштабе времени многоаспектной и объективной аэрокосмической информации о контролируемой территории или об объекте из Интернета или других доступных информационных и телекоммуникационных систем позволяет использовать системный (кибернетический) подход к ее анализу. Кибернетические системы позволяют автоматизировать процессы анализа и *синтеза знаний на основе* тех или иных разрозненных и, на первый взгляд, не связанных единой логикой данных, что даёт абсолютно новое качество, позволяющее предугадать, а значит и предупредить негативное развитие тех или иных процессов и явлений. Так моделируется интеллектуальная система обеспечения безопасности, которая дает возможность на порядок повысить эффективность функционирования различных компьютерных систем, в том числе связанных с принятием стратегических решений, отвечающих за безопасное развитие технологических процессов, используемых в системах управления территориально-промышленными комплексами, войсками, правоохранительными структурами.



Рис. 5. Экспертная система мониторинга нефтяных загрязнений Каспийского моря (обнаружение источника загрязнений, моделирование течений и мест загрязнений)

Это и автоматизированный поиск информационных взаимосвязей любых объектов и субъектов исследования, событий, фактов, формализованных знаний из всех видов баз данных, существующих в мире, в том числе неструктурированной текстовой информации. Это пространственная визуализация сложноструктурированной информации в графическом и табличном видах. Это статистический и географиче-

ский анализ событий, нахождение скрытых, латентных объектов и многое другое. Западные автоматизированные информационные системы уже хорошо зарекомендовали себя в сфере борьбы с организованной преступностью, незаконным оборотом наркотиков, экономическими преступлениями.

Учитывая исключительную важность антикриминальной деятельности, рассмотрим основные направления эффективного применения кибернетических систем при решении следующих задач управления безопасностью:

 планирования мероприятий по расследованию фактов нарушений правил безопасности;

 установления неявных связей и выявления фактов нестыковки в событиях и – месторасположении при расследовании дел;

моделирования исследуемых ситуаций в пространстве-времени;

- систематизации событий и упорядочения их по типу и значимости;

– определения цели, рабочих гипотез, полезной информации, порядка ее получения и тестирования;

- дешифрирования фотоснимков и аэрофотоснимков и их интерпретации (рис. 4);

 – определения слабых с точки зрения безопасности зон и объектов и разработки мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций (рис. 5);

 – определения наиболее вероятных мест концентрации или возможного обнаружения (проявления) криминальных группировок;

– предотвращения массовых преступлений и террористических актов, промышленного шпионажа, незаконного оборота наркотиков.

Резюме

Статья преследовала следующие цели:

 показать на примерах, как дистанционное зондирование Земли может помочь при принятии важных геополитических решений, принимая во внимание существующую ситуацию на планете;

 – экспертный анализ космических снимков может стать мощным инструментом для обоснования геополитических решений;

 учитывая высокую степень реалистичности отображения реального мира, информация с космических съемок открыта пользователям и может служить как мощная база данных или как фотодокументы реальных ситуаций, возникающих на Земле;

- космические снимки остаются в открытом доступе (как копии) и в оригинале [5].

Литература

1. David Shim. Seeing from Above: The geopolitics of satellite vision and North Korea. GIGA Reseach unit: GIGA Institute of Asian Studies. Working paper, № 201, August 2012.

2. Семенов В. И. Диагноз из космоса. О новых технологиях управления. Металлы Евразии. Национальное обозрение. – 1997. – № 6. – С. 68 – 71.

3. Семенов В. И. Нефть и экология Каспия // Геодезия и картография. – 1998. – № 2. – С. 33 – 38.

4. Попович В. В., Цветков М. В., Ведешин Л. А., Потапычев С. Н., Ермолаев В. И. и др. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки. – СПб.: Наука, 2013. – С. 283.

5. Ведешин Л. А. Об использовании космической информации в интересах социально-экономического развития регионов Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 5. – С. 90 – 92.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ NCR18650В ПРИ СОЗДАНИИ БАТАРЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. И. Груздев, Г. А. Жемчугов (AO «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Аннотация. Проведены комплексные испытания партии из более 1500 литийионных аккумуляторов NCR18650B фирмы «Panasonic». Показано, что они обладают высокой воспроизводимость основных параметров и удельной энергией 240 Вт·ч/кг, имеют очень низкий саморазряд, работоспособны в условиях пониженного (до 1·10⁻⁶ Па) давления, устойчивы к воздействию радиационных факторов открытого космического пространства. Аккумуляторы успешно прошли тесты на безопасность: перезаряд, короткое замыкание, принудительный разряд (переполюсовка). Экспериментально подтвержден ресурс ЛИА при глубоком (80 %) разряде 1500 циклов и наработка более 9000 циклов разряда глубиной 23 %. Полученные результаты подтверждают перспективность использовании аккумуляторов для создания высокоэнергоемких отказоустойчивых батарей с большим сроком службы при работе вне гермоотсека КА и позволяют прогнозировать ресурс их работы в составе батареи более 30000 циклов.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, аккумуляторная батарея, система электроснабжения, космический аппарат, удельная энергия, саморазряд, срок службы.

Одной из приоритетных задач создания систем электроснабжения космических аппаратов является увеличение удельных энергетических характеристик аккумуляторных батарей (АБ), масса которых для малых космических аппаратов может составлять до 50 % от массы всей системы электроснабжения [1].

Решить эту задачу можно только используя литий-ионные аккумуляторы (ЛИА), которые в настоящее время имеют наиболее высокую удельную энергоемкость, реализованную на серийных образцах. В частности, фирма ABSL Space Products (Англия) показала перспективность использования индустриальных аккумуляторов фирмы Sony 18650 HC емкостью 1,5 А·ч для создания высокоэнергоемких батарей с большим сроком службы и высокой надежностью работы в составе космического аппарата [2].

Целью данной работы являлось комплексное исследование возможности использования ЛИА NCR18650B фирмы «Panasonic» для создания АБ для систем электроснабжения косметических аппаратов дистанционного зондирования земли. Этот аккумулятор имеет встроенный механический размыкатель (CID), разрывающий его силовую цепь при повышении внутреннего давления (рис. 1), что позволяет организовать защиту АБ от отказов единичных ЛИА.

Проверка устойчивости ЛИА к воздействию пониженного атмосферного давления при выполнении зарядно-разрядных циклов в диапазоне напряжений от 3,0 до 4,15 В, проведенная на сборке из 8-ми аккумуляторов в вакуумной камере при температуре 30 °C в течение 48 часов показала их работоспособность в условиях пониженного (до $1 \cdot 10^{-6}$ Па) давления.





Рис. 1. Конструкция механического размыкателя CID [3]

Признаки разгерметизации, а также ухудшение параметров ЛИА, не наблюдались. Проведенные комплексные испытания партии из более 1500 аккумуляторов показали, что они не только обладают высокой удельной энергией (240 Вт·ч/кг), но и благодаря большому объему и высокой культуре производства, имеют отличную воспроизводимость основных параметров: среднеквадратичное отклонение для емкости – 1,7 %, для *R*_{вн} – 3 % (рис. 2).



Рис. 2. Значения емкости (а) и внутреннего сопротивления (б) партии ЛИА

Аккумуляторы имеют очень низкий саморазряд: за 4500 часов хранения снижение напряжения разомкнутой цепи (НРЦ) составило около 10 мВ, за 12000 часов – порядка 20 мВ, причем среднеквадратичное отклонение в скорости саморазряда для партии из 750 аккумуляторов составило менее 7 % (рис. 3).

Они также обладают необходимой устойчивостью к механическим воздействиям, имеющим место при транспортировке и выведении КА на орбиту:

- линейные ускорения до 10 g;
- низкочастотная (5 20 Гц) вибрация до 3 g;
- широкочастотная (от 20 до 2000 Гц) вибрация;
- ударные воздействия до 9 g.



ис. 5. Саморазряд аккумуляторов NCK18050В при хранении *а* – снижение НРЦ; *б* – различие в скоростях саморазряда

Аккумуляторы работоспособны при воздействии радиационных факторов открытого космического пространства. Исследования с использованием моделирующей установки ЛЭУТ-10-10ТМ на 3-х группах из 3-х ЛИА каждая, показали, что все технические параметры аккумуляторов в норме после воздействия фактора 7.К₁, а их радиационная стойкость составляет 1,5.2 К.

Аккумуляторы успешно прошли тесты на безопасность в соответствии с ГОСТ Р МЭК – 62133-2004:

 перезаряд током 0,5 °C: срабатывание предохранителя CID при напряжении 4,8 – 4,9 В, максимальная температура ЛИА – 51 С;

 принудительный разряд (переполюсовка) ЛИА с напряжением 3,0 В током 1С: срабатывание предохранителя CID через 90 минут, максимальная температура аккумулятора – 78 °С.



Рис. 4. Препарированный ЛИА NCR18650В после испытаний на устойчивость к перезаряду



Рис. 5. Напряжения окончания разряда для 4-х групп ЛИА с различным напряжением окончания заряда

В процессе испытаний на перезаряд и принудительный разряд видимые нарушения в узле герметизации и утечка электролита из аккумуляторов не наблюдались. Срабатывание предохранителя CID было подтверждено в дальнейшем при препарировании испытанного на устойчивость к перезаряду аккумулятора (рис. 4).

Экспериментально подтвержден ресурс ЛИА при глубоком разряде (80%) – 1500 циклов. В настоящее время ведутся ресурсные испытания на циклический разряд глубиной 23 % 4-х групп по 10 ЛИА в каждой при различных значениях максимального зарядного напряжения (рис. 5). Как видно из рисунка циклическая наработка превысила 9000 циклов. При этом снижение напряжения окончания разряда за 24 месяца испытаний составило порядка 1,4 %.

Выводы

1. Результаты выполненных АО «Корпорация «ВНИИЭМ» комплексных исследований подтверждают перспективность использовании ЛИА NCR18650В фирмы Panasonic для создания высокоэнергоемких отказоустойчивых безопасных батарей с большим сроком службы при работе вне гермоотсека КА.

2. Проведенные ресурсные испытания позволяют прогнозировать ресурс их работы в составе АБ более 30000 циклов.

Литература

1. Груздев А. И. Концепция построения высокоэнергоемких аккумуляторных батарей для авиационно-космических применений. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 147. № 4. – С. 38 – 44.

2. Chris Pearson, David Curzon, Rob Spurrett, Ka Lok Ng. The ABSL 100 – 150Ah Lithium-Ion batteries provided to NASA for the SDO and LRO programs // Presentation template proprietary information R800040. ABSL Space Products, 2008.

3. Natalie Anderson, Minh Tran, Eric Darcy. 18650 cell bottom vent: preliminary evaluation into its for preventing side wall rupture. S&T meeting San Diego, CA 7 Dec 2016.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ГАБАРИТА 18650

А. И. Груздев, С. В. Давыдов, Г. А. Жемчугов, Е. О. Лебедев (AO «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Аннотация. Обоснована задача обеспечения эффективного теплоотвода и создания равномерного температурного поля в литий-ионной аккумуляторной батарее (AБ), решение которой является необходимым условием для достижения высокого ресурса ее работы в составе КА. Рассмотрена решающая эту задачу разработанная АО «Корпорация «ВНИИЭМ» конструкция АБ на основе малогабаритных аккумуляторов типоразмера 18650, имеющих находящийся под электрическим потенциалом металлический корпус цилиндрической формы. Приведены результаты исследования равномерности распределение температур в этой батарее при ее непрерывном циклировании при различных температурах посадочной поверхности из диапазона от минус 10 до плюс 37 °С. Показано, что разработанная конструкция обеспечивает в условиях отсутствия конвекционного газового теплообмена с окружающей средой равномерность теплового поля в АБ и позволяет эффективно отводить выделяющееся в аккумуляторах тепло на посадочную плиту.

Ключевые слова: космический аппарат, аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, температурное поле, теплообмен.

Введение

Более чем десятилетний опыт эксплуатации аккумуляторных батарей фирмы ABSL Space Products (Великобритания) в космосе, в том числе и на российских космических аппаратах (КА) серии «Канопус», «Ломоносов» и др., показал возможность и целесообразность применения индустриальных литий-ионных аккумуляторов габарита 18650 (ЛИА) для построения надежных, устойчивых к единичному отказу аккумуляторных батарей (АБ) для систем электроснабжения космических аппаратов [1]. АО «Корпорация «ВНИИЭМ» на базе таких аккумуляторов разработан экспериментальный образец АБ 29В/48Ач для использования в системах электроснабжения КА дистанционного зондирования земли. Работоспособность сконструированных для работы в наземных условиях аккумуляторов при воздействии факторов открытого космического пространства обеспечивается конструкцией батареи [2].

Целью настоящей работы являются стендовые исследования теплообмена AБ 29B/48Aч с посадочной поверхностью при ее непрерывном циклировании в условиях, аналогичных ее работе вне гермоотсека КА, в которых отсутствует конвекционный отвод выделяющегося в аккумуляторах тепла. Одной из приоритетных задач при проектировании этой батареи было обеспечение эффективного теплоотвода от всех аккумуляторов при работе в вакууме, так как это является необходимым условием для достижения высокого ресурса работы АБ в составе КА. Решение этой задачи позволяет обеспечить равномерность температурного поля в батарее и, соответственно, близкие температурные условия и режимы эксплуатации всех аккумуляторов, требуемые для выравнивания скорости протекающих в них деградационных процессов. Различие в величинах основных параметров аккумуляторов (номинальная емкость, внутреннее сопротивление, ток саморазряда) приводит к разбалансировке напряжений аккумуляторов и обусловленному ею снижению разрядной ёмкости батареи.

Организация в АБ, в условиях отсутствия конвекционного газового теплообмена с окружающей средой, эффективного отвода тепла от аккумуляторов, имеющих находящийся под электрическим потенциалом металлический корпус цилиндрической формы, связана с определенными сложностями. В АБ 29В/48Ач (рис. 1) эта задача решена закреплением аккумуляторов 1 в электроизоляционных полиамидных холдерах 2, установленных вертикально на одном металлическом основании 3, с помощью которого АБ устанавливается на посадочную поверхность КА. Для обеспечения равномерного температурного поля в батарее предусмотрено 8 металлических радиаторов 4, реализующих кондуктивный теплообмен между аккумуляторами и основанием, от которого они отделены теплопроводящей (1,2 Вт/м·К) электроизоляционной прокладкой 5. Аккумуляторы своей центральной частью закреплены в отверстия радиаторов с помощью теплопроводящего (1,3 Вт/м·К) электроизоляционного клея. Для подключения к внешним электрическим цепям в АБ предусмотрены два цилиндрических разъема 6.



Рис. 1. Аккумуляторная батарея 29В/48А-ч [3]

АБ с помощью термопасты установлена на посадочную плиту, температура которой в процессе исследований последовательно изменяли в диапазоне от минус 10 до плюс 37 °С. После трехчасовой выдержки при каждой температуре начинался процесс непрерывного циклирования АБ со средним тепловыделением за цикл заряда/разряда 8,5 Вт. Температура составных частей батареи измерялась с использованием десяти закрепленных на ней цифровых термодатчиков в автоматическом режиме с дискретностью записи текущих значений 1 минута и точностью определения температуры $\pm 1^{\circ}$ С. После достижения установившегося теплового режима АБ регистрировались и анализировались значения температуры ее составных частей.

Основные результаты исследования температурного поля АБ приведены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Температура составных частей АБ при различных температурах посадочной плиты



составных частей АБ

Как видно из рис. 2 во всем исследованном диапазоне температур посадочной плиты различие между температурами аккумуляторов и радиаторов не превышает 2 - 3 °C.

Разность температур составных частей АБ (рис. 3) уменьшается при увеличении температуры посадочной плиты. Максимальное превышение температуры аккумуляторов относительно температуры посадочной плиты (7,5 °C) наблюдается при ее

температуре минус 10 °C, минимальная разница – при температуре плиты плюс 37 °C (3 °C). При этом разница температур между радиатором и основанием AB снижается от 4,5 °C до 2 °C соответственно.

Следует отметить, что в процессе исследования разность температур посадочной плиты и основания АБ при всех температурах не превышала 1,5 °C.

Проведенные исследования температуры аккумуляторной батареи с помощью телевизора Fluke Ti32 при её циклировании в вакуумной камере также подтвердили высокую равномерность температурного поля. В качестве примера на рис. 4 приведена фотография АБ в инфракрасном диапазоне сразу после окончания её заряда током 10 А. Как видно из рисунка, отличие в температурах аккумуляторов, радиаторов и основания в батарее не превышает 1,5 °C.



Рис. 4. Фотография АБ в инфракрасном диапазоне, полученная с помощью телевизора Fluke Ti32

Таким образом анализ полученных экспериментальных данных показывает, что вклейка аккумуляторов в металлические радиаторы, установленные на металлическом основании через теплопроводящую прокладку, позволяет эффективно отводить выделяющееся в них тепло на основание батареи и обеспечить разницу между их температурами не более 1 - 2 °C.

Заключение

Проведенные исследования показали, что конструкция АБ 29В/48Ач в условиях отсутствия конвекционного газового теплообмена с окружающей средой обеспечивает:

 – равномерность теплового поля в АБ во всем исследованном диапазоне температур посадочной плиты; хороший теплообмен аккумуляторов через радиаторы с основанием АБ, что позволяет эффективно отводить выделяющееся в аккумуляторах тепло на посадочную плиту.

Теплообмен между аккумуляторами и основанием АБ может быть улучшен за счет:

 повышения теплопроводности используемого для установки аккумуляторов в радиаторы клея, например, путём ввода в его состав соответствующей добавки;

 использования прокладки с более высокой теплопроводностью или доработки конструкции батареи с целью исключения необходимости в электрической изоляции радиаторов от основания батареи с помощью прокладки.

Литература

1. Груздев А. И., Жемчугов Г. А. Системные подходы и тенденции создания аккумуляторных батарей для систем электроснабжения малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли. Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 75 – 77.

2. Макриденко Л. А., Жемчугов Г. А., Груздев А. И., Лебедев О. Ю. Проблемы и перспективы создания литий-ионных аккумуляторных батарей для низкоорбитальных космических аппаратов // 14-я Международная конференция «Актуальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах. Суздаль, 11 – 15 сентября 2016 г.: Сборник тезисов. – М.: Издательство «Граница», 2016. – С. 13.

3. Рекламная информация АО «Корпорация «ВНИИЭМ» на Московском авиационно-космическом салоне МАКС-2015.

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД УСТРОЙСТВА ПОВОРОТНОГО СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. О. Якимовский, Д. С. Положенцев, Д. Й. Джукич (АО «НИИ командных приборов»)

Аннотация. Приведены результаты разработки поворотного устройства солнечной батареи. Представлена структурная схема и технические характеристики основных элементов электропривода. Рассмотрены вопросы создания системы управления для контроля угловых скоростей и ускорений. Приведены результаты экспериментальной отработки исполнительного электропривода.

Ключевые слова: электропривод, вентильный двигатель, система управления скоростью, система контроля ускорения, обратная связь по углу.

В работе представлены результаты создания исполнительного электропривода (ИЭП) устройства поворотного солнечной батареи (УПСБ) космического аппарата (КА). ИЭП УПСБ должен обеспечивать угловую скорость выходного вала (ВВ) в диапазоне \pm (0; 0,0039 ... 0,5) °/с, с дискретностью не более 0,000244 °/с. Особенностью ИЭП УПСБ является наличие требования по ограничению ускорения вращения ВВ и наличие высокого нестабильного момента сухого трения (до 0,5 H⋅м), возникающего в контактно-щеточном устройстве передачи энергии от солнечной батареи к системе энергообеспечения КА. Значение углового ускорения вращения ВВ должно быть в диапазоне от 0,0012 до 0,01 °/с², а погрешность средней угловой скорости ВВ в установившемся режиме должна быть не более 10 % для всего диапазона, при внешних возмущающих моментах, на фоне действия момента сухого трения, от -0,3 до 0,3 Н·м. Высокие требования по ограничению габаритно-массовых характеристик, стойкости к факторам космического пространства, длительный срок активного существования КА существенно повлияли на структуру и состав электропривода. Разработанный ИЭП УПСБ относится к классу безредукторных приводов прямого типа, и включает в свой состав вентильный двигатель, датчик угла (ДУ), и блок управления устройством поворотным (БУУП). ИУП используется одновременно в контуре управления скоростью ВВ и в контуре управления вентильным двигателем. Функционально датчик входит в состав 16-разрядного измерителя углового положения (ИУП) электронного преобразователя (ЭП) размещенного БУУП. Датчик угла и вентильный двигатель разработаны и изготавливаются в АО «НИИ командных приборов».

Блок управления устройством поворотным

БУУП исполнен на основе отечественной элементной базы и построен на основе отечественного 32-разрядного микроконтроллера (МК) с ядром ARM Cortex. Применение мощного МК позволило реализовать в нем выполненные нескольких задач:

 взаимодействие с системой управления верхнего уровня по магистральному последовательному интерфейсу;

обработку сигналов ДУ;

векторное управление вентильным двигателем; алгоритм векторного управления двигателем [1];

- управление скоростью и ускорением ВВ;

– оцифровка напряжений осуществляется в АЦП МК.

С целью повышения надежности изделия в его состав входят 4 канала БУУП.

Вентильный двигатель

В ИЭП используется вентильный электродвигатель, выполненный на базе синхронной электрической машины с постоянными магнитами на роторе. Основные технические характеристики двигателя:

– номинальный ток, А	1,2
 номинальный момент, Нм 	1,2
– активное сопротивление фазы двигателя, Ом	8,2
– индуктивность фазы, Гн	0,01
– число пар полюсов	8
– число фаз	3
— масса, кг	1,04.

Габаритный чертеж двигателя представлен на рис. 1.



Рис. 1. Габаритный чертеж двигателя ИЭП УПСБ

Двигатель имеет бескорпусное исполнение и встраивается непосредственно в конструкцию УПСБ. С целью повышения надежности изделия обмотка статора дублирована.

В двигателе отсутствует датчик положения ротора – использование микропроцессорного (цифрового) регулирования и ИУП в составе привода позволяют сформировать коммутационную функцию управления двигателем без использования ДПР, тем самым улучшив габаритно-массовые характеристики УПСБ.

Датчик угла

ДУ представляет собой двухотсчетный синусно-косинусный многополюсный вращающийся трансформатор, работающий в амплитудном режиме.

Конструктивно ДУ состоит из ротора и статора. Габаритный чертеж датчика угла представлен на рис. 2. На роторе расположены обмотки возбуждения грубого отсчета (ГО) и точного отсчета (ТО) и закороченная компенсационная обмотка. На статоре

расположены выходные обмотки ГО и ТО. С целью повышения надежности изделия в его состав входят два ДУ.



Рис. 2. Габаритный чертеж датчика угла ИЭП УПСБ

Выходные сигналы, снимаемые с обмоток ГО и ТО, зависящие от углового положения ротора относительно статора, передаются в ПЭ.

Технические характеристики Д	,)	/:	
------------------------------	-----	----	--

 напряжение возбуждения переменного тока частотой 	1,5 кГц, В 8
 коэффициент электрической редукции, ТО/ГО 	64/1
– погрешность точного отсчета, угловых секунд, не более	60
– погрешность грубого отсчета, угловых минут, не более	40
— масса, кг	0,315.

Структурная схема ИЭП УПСБ

Представлена на рис. 3, где Φ_{ω} – формирователь кода скорости; И – интегратор; РУ – пропорциональный дифференциальный регулятор контура угла; ВШИМ – векторный широтно-импульсный модулятор; КУМ – ключевой усилитель мощности; ДВ – двигатель; СБ – солнечная батарея; ДУ ВВ – датчик угла ВВ; ЭП ДУ ВВ – электронный преобразователь датчика угла выходного вала; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УС – устройство сопряжения; МК – микроконтроллер; БУУП – блок управления устройством поворотным; ИЭП – исполнительный электропривод; N_{ω} – код задаваемой угловой скорости вращения ВВ; $N_{\omega}^{\text{расч}}$ – расчётный код угловой скорости вращения ССС – исператор и вак сорости вания контура угла; $N_{\text{циим}}$ – входное значение кода вШИМ; T_{a} , T_{b} , T_{c} – длительности сигналов вШИМ, управляющие КУМ; $U_{\text{амп1}}$, $U_{\text{амп2}}$, $U_{\text{амп3}}$ – амплитудные значения линейных напряжений подаваемых на двигатель; *a*_{BB} – значения углового положения BB; ω_{CB} – значения угловой скорости CБ; М_{упр} – значение упругого момента, создаваемого СБ; N_{BB} – код измеренного угла поворота BB; МПИ – магистральный последовательный интерфейс.



Управление скоростью вращения

В связи с использованием в контуре обратной связи ИУП, система управления угловой скоростью вращения основана на интегрировании задающего скорость сигнала и последующей работе в режиме следящей системы по угловому положению ВВ. В качестве регулятора контура угла был использован ПД – регулятор [2, 3].

При расчете коэффициента интегрирования скорости следует учитывать, что разрядные сетки задаваемого значения скорости и измеренного значения углового положения могут иметь различное число разрядов, при этом разрядные сетки задающего и измеренного значений углового положения обязательно должны быть одинаковыми.

Коэффициент интегрирования скорости вычисляется по следующей формуле:

$$K_{\omega} = \frac{K_{\rm sp}}{\delta},\tag{1}$$

где *К*_{КР} – кругизна характеристики «код-скорость», δ – дискретность преобразования «угол-код» датчика угла.

Крутизна характеристики «код-скорость» определяется как:

$$K_{\omega} = \frac{\omega_{\text{sag.max}}}{2^n - 1},\tag{2}$$

где $\omega_{3a, max}$ — максимальная задаваемая скорость, *n* — используемое число разрядов регистра, хранящего значение задаваемой скорости (без учета знакового разряда).

Управление угловым ускорением

Наиболее простым решением задачи стабилизации ускорения (момента двигателя), могло бы быть ограничение амплитуды тока в обмотках исполнительного двигателя. Однако, в силу того, что момент трения представляет собой не постоянное значение (точная величина которого не известна) в зависимости от углового положения BB – настроить подобный «ограничитель тока» не представляется возможным. Для разрешения этой проблемы в структуру ИЭП был введен формирователь кода скорости (Φ_{ω}). Формирователь кода скорости после поступления N_{ω} формирует линейно нарастающий (убывающий) код угловой скорости $N_{\omega}^{\text{расч}}$ с ограничением на уровне соответствующем коду N_{ω}

Для обеспечения ограничения углового ускорения вращения BB (ε_{BB}) в диапазоне от 0,0012 до 0,01 °/с², скорость нарастания (убывания) расчетного кода угловой скорости вала двигателя определяется по разностному уравнению:

$$N_{\omega}^{\mathrm{pacy}}(n) = k_{\mathrm{H}\Phi} \cdot T_{s} \cdot N_{\omega}(n) + N_{\omega}^{\mathrm{pacy}}(n-1),$$

где n – номер такта работы ИЭП; T_s – период дискретизации; $k_{u\phi}$ – коэффициент интегратора формирователя

$$k_{\rm H\Phi} = \varepsilon_{\rm BB} \cdot \frac{1}{\omega_{\rm BB}},$$

где $\omega_{\mathrm{BB}} = N_{\omega}(n) \cdot D_{\mathrm{BB}}$.

Для обеспечения требования по ускорению BB от 0,0012 до 0,01 °/с², по результатам моделирования, было выбрано среднее значение углового ускорения BB:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\rm BB} = 0,005, \ \text{при } N_{\omega} > N_{\omega}^{\rm pacu} \\ \varepsilon_{\rm BB} = -0,005 \ \text{при } N_{\omega} < N_{\omega}^{\rm pacu} \\ \varepsilon_{\rm BB} = 0, \text{при } N_{\omega} = N_{\omega}^{\rm pacu} \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{cases} k_{\mathrm{H}\Phi} = \frac{\varepsilon_{\mathrm{BB}}}{N_{\omega}(n) \cdot D_{\mathrm{BB}}}, \ \mathrm{\Pi}\mathrm{pu} \ N_{\omega} > N_{\omega}^{\mathrm{pacy}} \\ k_{\mathrm{H}\Phi} = \frac{-\varepsilon_{\mathrm{BB}}}{N_{\omega}(n) \cdot D_{\mathrm{BB}}}, \ \mathrm{\Pi}\mathrm{pu} \ N_{\omega} < N_{\omega}^{\mathrm{pacy}} \\ k_{\mathrm{H}\Phi} = 0, \ \mathrm{\Pi}\mathrm{pu} \ N_{\omega} = N_{\omega}^{\mathrm{pacy}} \end{cases}$$

Результаты моделирования и испытаний, опытных образцов ИЭП УПСБ показали эффективность принятых схемотехнических решений. Предложенная структура привода позволяет обеспечить точное управление скоростью вращения с управляемым значением ускорения ВВ УПСБ в условиях действия большого нестабильного момента сухого трения.

Для иллюстрации, на рис. 4 приведены результаты испытаний опытного образца ИЭП УПСБ. Пунктирными линиями обозначен коридор допустимых значений угловой скорости вращения ВВ. Видно, что ускорение, как и скорость, контролируется системой управления с заданной точностью. Погрешность отработки угловой скорости вращения ВВ в установившемся режиме составила 0,5 %.



Рис. 4. Отработка ИЭП УПСБ угловой скорости BB + 0,5 °/с

Предложенная структура привода позволяет обеспечить точное управление скоростью вращения с управляемым значением ускорения ВВ УПСБ в условиях действия большого нестабильного момента сухого трения. В настоящее время идет подготовка к летным испытаниям.

Литература

1. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика), 2013. - 68 с.

2. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением/ Р. М. Трахтенберг. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.

3. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ БАТАРЕЙ В SP- И PS-КОНФИГУРАЦИЯХ К ОТКАЗАМ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

А. И. Груздев, С. В. Давыдов, Г. А. Жемчугов, Е. О. Лебедев (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Аннотация. Рассмотрены достоинства и недостатки использования различных электрических конфигураций для построения литий-ионных аккумуляторных батарей (АБ) космических аппаратов. Проведены расчеты и сравнительный анализ изменения разрядной емкости и внутреннего сопротивления литий-ионных АБ в различных электрических конфигурациях при многочисленных (12 %) отказах единичных аккумуляторов, связанных с деградацией их основных электрических параметров: потерей номинальной ёмкости, обрывом внутренней электрической цепи, многократным (на 1 – 2 порядка) повышением тока саморазряда. Расчёты выполнены с использованием разработанной в среде Mathcad модели для АБ в конфигурациях 8P8S и 8S8P с восемью распределенными случайным образом отказавшими аккумуляторами. Показано, что с точки зрения потери емкости PS-конфигурация имеет преимущества перед SP-конфигурацией при реализации АБ при всех типах отказов аккумуляторов за исключением случаев появления больших токов саморазряда в деградирующих аккумуляторах. При таком отказе аккумуляторов АБ в SP-конфигурации становится предпочтительнее при больших сроках эксплуатации.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, емкость, внутреннее сопротивление, отказоустойчивость, космический аппарат.

Введение

Аккумуляторная батарея (АБ) является одним из основных элементов системы электропитания космического аппарата (КА), во многом определяющий срок активного существования (САС) КА. На практике для построения АБ КА используются следующие основные электрические конфигурации [1]:

- последовательная схема (S);
- последовательно-параллельная схема (SP);
- параллельно-последовательная схема (PS).

Последовательное соединение единичных аккумуляторов в батарею используется из-за относительно простой ее компоновки. Однако такое построение батареи приводит к полной потере ее работоспособности при отказе хотя бы одного аккумулятора.

Существенно более высокой устойчивостью к отказам аккумуляторов обладают выполненные в SP-или PS-конфигурациях АБ на базе аккумуляторов малой (единицы А·ч) емкости, снабженных встроенным одноразовым механическим размыкателем CID (current interrupt device – устройство прерывания тока), разрывающим силовую цепь при повышении внутреннего давления. В отличие от аккумуляторных батарей в S-конфигурации, теряющих полностью работоспособность при отказе одного любого аккумулятора, такие батареи незначительно (на величину емкости единичного аккумулятора) снижают емкость, полностью сохраняя свою работоспособность [2]. Целью настоящей работы является расчет и сравнительный анализ изменения разрядной емкости и внутреннего сопротивления литий-ионных АБ в электрических конфигурациях 8P8S и 8S8P (рис. 1) при многочисленных (12 %) отказах единичных аккумуляторов. Рассмотрено влияние на разрядную ёмкость АБ деградации (ухудшения) следующих основных электрических параметров аккумуляторов:

- номинальной емкости;
- внутреннего сопротивления;

- тока саморазряда.



а – SP-конфигурация (8S8P); б – PS-конфигурация (8P8S)

Различие в скорости саморазряда между ячейками становится причиной разбаланса в степени заряженности аккумуляторов (проявляющемуся в появлении разбаланса напряжений в АБ). Следствием разбаланса напряжений является снижение разрядной емкости и работа батареи по «худшему» (наиболее разряженному) аккумулятору, даже если он имеет наибольшую номинальную емкость среди всех аккумуляторов в батарее. В общем случае разбаланс напряжений в АБ может быть устранен аппаратно с помощью электронных блоков выравнивания напряжения [3]. В настоящей работе сравнительные оценки вариантов электрических конфигураций проведены для АБ, не имеющих таких аппаратных средств.

Рассмотрены следующие варианты деградации параметров ЛИА:

 – снижение ёмкости от номинальной до полного отказа этого единичного аккумулятора (деградация до 100 % от номинальной ёмкости ЛИА);

– увеличение сопротивления внутренней цепи от начального до обрыва внутренней цепи (величина сопротивление 1 МОм);

- увеличение тока саморазряда от номинального до 1 мА.

Для количественной оценки снижения емкости в среде Mathcad разработана модель АБ и проведены расчеты для указанных выше электрических конфигураций аккумуляторов с параметрами, аналогичными параметрам аккумулятора NCR18650B:

- номинальная емкость аккумулятора C_{ном} - 2,6 А·ч;

- начальное внутреннее сопротивление $R_{\rm BH} - 70$ мОм;

- ток саморазряда - 0,035 мА.

Расчеты проведены для восьми деградирующих ЛИА, распределенных случайным образом в АБ. Места расположения деградирующих ЛИА в АБ заданы с помощью генератора случайных чисел.

Определение снижения емкости АБ при отказах восьми ЛИА, связанных с полной потерей их емкости, проведено для выборки из 1000 случайных вариантов их распределения в АБ. Для каждого варианта распределения ЛИА рассчитано значение емкости АБ. Затем для каждого изменяющегося с дискретностью 2,6 А·ч (емкость единичного ЛИА) значения емкости АБ подсчитано количество вариантов распределений с такой емкостью. Результаты расчета для SP- и PS-конфигураций АБ, приведённые к относительным значениям числа распределений и ёмкости, представлены на рис. 2.



Рис. 2. Изменение емкости АБ в PS- и SP-конфигурациях при отказах восьми ЛИА для выборки из 1000 вариантов их распределений

Как видно из рисунка, у АБ в SP-конфигурации практически во всех вариантах распределений восьми отказавших аккумуляторов емкость снижается на 50 % и более, вплоть до полной ее потери. Существенно меньшее снижение ёмкости при отказах единичных аккумуляторов имеет место у АБ в PS-конфигурации: для 98 % вариантов распределений снижение емкости составляет от 12,5 до 50 %, а для 42 % распределений оно не превышает 25 %.

Результаты аналогичных расчетов внутреннего сопротивления АБ (*R*_{вн}) при обрыве в силовой цепи восьми ЛИА приведены на рис. 3. Расчеты показали, что устойчивость рас-

смотренных конфигураций к изменению внутреннего сопротивления при отказах (обрыве силовой цепи) ЛИА аналогична рассмотренной выше устойчивости к потере их емкости. Для PS-конфигурации увеличение внутреннего сопротивления АБ незначительно и составляет порядка 20 %. При этом у АБ в SP-конфигурации увеличение внутреннего сопротивления существенно выше: преимущественно на 160 – 280 %, но имеются варианты распределения отказавших аккумуляторов, при которых оно достигает 680 %.



Рис. 3. Изменение R_{ви} АБ в PS- и SP-конфигурациях при отказах восьми ЛИА для выборки из 1000 вариантов их распределений (* - обрыв силовой цепи, 6 случаев из всей выборки)

Таким образом, результаты проведённых расчётов показали, что при отказах, связанных с потерей емкости или, аналогичным по последствиям, обрывом силовой цепи ЛИА, устойчивость АБ в PS-конфигурации в плане сохранения ее емкости и внутреннего сопротивления выше по сравнению с SP-конфигурацией.

Однако для АБ в PS-конфигурациях, не имеющих аппаратных средств нивелирования разбаланса напряжений аккумуляторов, появление повышенных токов саморазряда в единичных ЛИА может привести к бесконтрольному разряду через него всего пакета из параллельно включенных аккумуляторов, что в условиях длительной эксплуатации АБ приведет к ее разбалансировке. Следствием разбалансировки пакетов станет или потеря фактической разрядной емкости (при наличии поэлементного контроля при заряде АБ), или снижающий ресурс перезаряд пакетов аккумуляторов (при контроле только общего напряжения АБ).

Анализ отказоустойчивости АБ к повышенным токам саморазряда проведен для наиболее часто встречающегося (типичного) варианта случайных распределений восьми деградирующих ЛИА: в матрице 8 × 8 имеется 2 столбца (и строки) с двумя ЛИА, 4 столбца (и строки) с одним ЛИА и 2 столбца (и строки) не имеющих дегра-
дирующих ЛИА. Рассмотрен случай повышения тока саморазряда деградирующих аккумуляторов до 0,1 мА, что в 30 раз превышает номинальный ток саморазряда аккумуляторов NCR18650B. Оценка устойчивости к токам саморазряда проведена при условии, что в АБ осуществлен контроль за напряжением и обеспечена работа каждого аккумулятора без перезаряда. Расчеты учитывают снижение разрядной емкости только за счет разбаланса напряжений в АБ и не включают составляющую, обусловленную снижением номинальной емкости ЛИА. Также не учитывается саморазряд остальных аккумуляторов в предположении, что для них он является одинаковым и компенсируется при заряде АБ.

Результаты расчетов представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что в течение 26000 часов емкость АБ в SP-конфигурации равномерно снижается с 20,8 до 5,2 А·ч из-за постепенного снижения до нуля емкости последовательных цепочек с ЛИА, имеющими повышенный саморазряд. Таким образом АБ теряет 75 % от номинальной емкости. Далее в соответствии с принятыми допущениями емкость АБ в процессе эксплуатации не изменяется. При этом у аккумуляторов в потерявших емкость цепочках возможно срабатывание внутренних предохранителей (CID), приводящее к полному выводу этих цепочек из состава АБ.



Рис. 4. Изменение в процессе эксплуатации емкости АБ в PS- и SP-конфигурациях при типичном распределении 8-ми ЛИА с токами саморазряда 0,1 мА

В рамках принятых допущений скорость снижения емкости АБ, обусловленная разбалансом напряжений в ней, в PS-конфигурации в процессе работы определяется пакетами, имеющими по 2 деградирующих аккумулятора. Она в 3 раза ниже по сравнению с SP-конфигурацией и при токах саморазряда 0,1 мА за 60000 часов емкость

АБ уменьшается до 9 А·ч (на 57 %). Это почти в 2 раза меньше по сравнению со снижением емкости АБ в SP- конфигурации за то же время эксплуатации.

Однако нельзя полностью исключить, что токи саморазряда некоторых аккумуляторов по различным причинам будут значительно выше 0,1 мА. Тогда снижение емкости АБ в PS-конфигурации из-за разбаланса напряжений между аккумуляторными пакетами будет идти намного интенсивнее. В качестве примера на рис. 5 показаны зависимости емкости АБ в PS- и SP-конфигурациях в процессе эксплуатации при токе саморазряда в 1 мА, в 300 раз превышающий номинальный ток саморазряда аккумуляторов NCR18650B.



Рис. 5. Изменение в процессе эксплуатации емкости АБ в PS- и SP-конфигурациях при типичном распределении 8-ми ЛИА с токами саморазряда 1 мА

Как видно из графика, PS-конфигурация имеет преимущества перед SPконфигурацией при реализации АБ со сроком службы только до 8000 часов. При более длительной эксплуатации из-за имеющего место разбаланса напряжений аккумуляторных пакетов АБ в PS-конфигурации снижает емкость вплоть до полной потери работоспособности.

Также следует отметить, что:

1) при основном типе отказов (медленной деградации параметров аккумулятора) для PS-конфигурации:

 идентичность характеристик аккумуляторных пакетов повышается за счет действия статистических факторов при соединении большого количества аккумуляторов параллельно;

 теряющий емкость ЛИА, автоматически разгружается из-за роста внутреннего сопротивления и имеет близкую или меньшую по отношению к остальным глубину разряда и, как следствие, скорость деградации параметров. В SP-конфигурации наоборот, деградация аккумулятора ускоряется по мере потери им емкости, так как ток разряда в последовательной цепочке из восьми ЛИА меняется в меньшей степени.

2) при обрыве силовой цепи внутри аккумулятора:

- при единичном отказе изменение емкости ЛИА во всех конфигурациях одинакова;

 при 2-х и более отказах для PS-конфигурации это снижение меньше по сравнению с SP-конфигурацией.

Заключение

Таким образом на основе результатов проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. С точки зрения потери емкости и роста внутреннего сопротивления АБ в PSконфигурации имеет преимущества перед АБ в SP-конфигурации при многочисленных отказах аккумуляторов, связанных с потерей ими емкости и обрыве силовой цепи.

2. При появлении отказов аккумуляторов, связанных с многократным ростом их токов саморазряда, реализация АБ в SP-конфигурации может быть предпочтительнее при больших сроках службы.

3. Защита АБ от появления больших токов саморазряда у части аккумуляторов может быть решена путем аппаратного нивелирования разбаланса напряжений.

4. Для рассмотренных АБ реализация блоков аппаратного нивелирования разбаланса напряжений существенно проще в PS-конфигурации, так как требуется выравнивание напряжений восьми аккумуляторных пакетов, а не каждого из 64-х аккумуляторов в случае SP-конфигурации.

Литература

1. Хромов А. В. Литий-ионные аккумуляторные батареи низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2016. – Т. 152. – № 3. – С. 20–28.

2. Груздев А. И. Концепция построения высокоэнергоемких аккумуляторных батарей для авиационно-космических применений // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 147. – № 4. – С. 38 – 44.

3. Груздев А. И. Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных и стационарных применений // Инновации. – 2014. – № 3 (185). – С. 12 – 20.

СИСТЕМНЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕНДЕНЦИИ СОЗДАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. И. Груздев, Г. А. Жемчугов (AO «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Аннотация. Рассмотрены основные тенденции в развитии аккумуляторных батарей, используемых в космической технике. Рассмотрены достоинства и недостатки различных схемотехнических решений, реализуемых при построении аккумуляторных батарей для космических аппаратов. На примере продукции ведущих зарубежных производителей обоснованы преимущества построения батарей для космических аппаратов на базе литий-ионных аккумуляторов относительно небольшой (до 5 А·ч) емкости, соединенных по последовательно-параллельной или параллельно-последовательной схеме. На примере собственных разработок показана перспективность подхода к созданию высокоэнергоемких (до 150 Вт·ч/кг) аккумуляторных батарей с большим сроком службы при работе вне гермоотсека КА, заключающемся в использовании аккумуляторов габарита 18650 индустриального применения в сочетании с оптимальными конфигурациями батареи.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, удельная энергоемкость, система электроснабжения, космический аппарат.

В последнее десятилетие малые космические аппараты дистанционного зондирования земли получили преимущественное развитие по сравнению с крупногабаритными космическими аппаратами [1]. Срок их активного существования во многом определяется характеристиками системы электроснабжения и, прежде всего, энергоемкостью и надежностью работы аккумуляторной батареи (АБ).

Целью настоящей работы является анализ системных подходов и основных тенденций в развитии аккумуляторных батарей, используемых в космической технике. В настоящее время развитие систем электроснабжения космических аппаратов связано с отказом от АБ с никель-кадмиевыми и никель-водородными аккумуляторами и использованием имеющих существенно большую удельную энергоемкость литий-ионных АБ [2].

Исторически сложилось, что ведущие зарубежные фирмы для использования в космических аппаратах разрабатывают литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) относительно большой емкости: Qualion (США) 15 и 75 А·ч [3]; Yardney (США) 7 – 55, 350 А·ч [4]; SAFT (Франция) 39 – 50 А·ч [5], GSYuasa (Япония) 50 – 175 А·ч [6]. Номенклатура единственного российского производителя ЛИА космического назначения ПАО «Сатурн» также ограничена емкостями 25, 50 и 120 А·ч [7].

Из-за относительно простой компоновки большинство указанных выше фирм строит свои батареи из одной или нескольких параллельных цепочек последовательно соединенных единичных аккумуляторов (рис. 1, a и 1, δ). Однако такое построение батарей приводит к частичной или полной потере их работоспособности при отказе хотя бы одного аккумулятора. Поэтому для обеспечения требуемой надежности и отказоустойчивости системы электроснабжения космического аппарата используется несколько независимо работающих батарей или сборка из нескольких параллельных аккумуляторных блоков (рис. 1, e).



Рис. 1. Литий-ионные аккумуляторные батареи фирмы «Yardney» [4]

Исключение из силовой цепи АБ отказавших или аномально деградировавших аккумуляторов возможно путем применения байпасных переключателей. Однако их использование связано с определенными трудностями из-за:

 – значительного снижения напряжения батареи после вывода из цепи АБ одного из последовательно соединенного аккумулятора или сборки аккумуляторов;

 необходимости использования работающих по относительно сложным алгоритмам электронных устройства контроля и управления работой байпасных переключателей;

- увеличения массы батареи.

Существенно более высокой надежностью и отказоустойчивостью обладают батареи, построенные на базе аккумуляторов малой (единицы А·ч) емкости, снабженных встроенным одноразовым механическим размыкателем, разрывающим силовую цепь при повышении внутреннего давления. Соединяя такие аккумуляторы по последовательно-параллельной (SP-конфигурация) или параллельно-последовательной (PS-конфигурация) схеме возможно на базе одного типоразмера аккумулятора создавать широкий параметрический ряд аккумуляторных батарей.

Например, для малых космических аппаратов фирма SAFT разработала цилиндрические ЛИА емкостью 4,5 А·ч [8]. Соединяя эти аккумуляторы по последовательнопараллельной схеме, фирма SAFT предлагает параметрический ряд литий-ионных аккумуляторных батарей с напряжением от 25 до 40 В и емкостью от 13,5 до 35 А·ч (S от 6 до 10, P от 3 до 8), которые в свою очередь могут соединяться по параллельной схеме (рис. 2). Защита от отказов ЛИА (потеря емкости, короткие замыкания или повышенный саморазряд, перегрев), в этих АБ построена на использовании встроенных в аккумулятор механических одноразовых размыкателей (current interrupt device – CID), которые при повышении внутреннего давления срабатывают и размыкают силовую цепь из последовательных ЛИА, полностью исключая ее из работы. При этом работоспособность АБ сохраняется при пониженной емкости.

Аналогичную электрическую конфигурацию для построения АБ КА использует и фирма ABSL (Англия) [9]. Однако она использует индустриальные цилиндрические литий-ионные аккумуляторы 18650HC емкостью 1,5 А·ч. В этих аккумуляторах фирмы Sony также имеется механический размыкатель CID, срабатывающий при соответствующем повышении его внутреннего давления (рис. 3).



Рис. 2. Литий-ионные батареи на основе аккумулятора VES16



Рис. 3. Устройство механического размыкателя цепи ЛИА 18650НС

Более чем десятилетний опыт эксплуатации этих батарей в космосе, в том числе и на российских космических аппаратах серии «Канопус», «Ломоносов» и др., показал возможность и целесообразность применения индустриальных аккумуляторов малой емкости для построения надежных, устойчивых к единичному отказу батарей, работающих вне гермоотсека космических аппаратов.

Работоспособность сконструированных для работы в наземных условиях аккумуляторов при воздействии факторов открытого космического пространства обеспечивается конструкцией батарей, в которые они соединяются по последовательнопараллельной схеме. Для использования в космической технике фирмой ABSL Space Products предлагаются аккумуляторные батареи емкостью от 18 до 480 А·ч, построенные по блочно-модульному принципу (рис. 4) [10].



Рис. 4. Аккумуляторные батареи фирмы «ABSL Space Products»

При этом удельная энергоемкость таких аккумуляторных батарей достигает 110 Вт·ч/кг, тогда как у современных литий-ионных батарей для малых космических аппаратов большинства производителей она менее 100 Вт·ч/кг (например, батарея фирмы SAFT емкостью 25 А·ч в конфигурации 8S6P имеет удельную энергоемкость 84 Вт·ч/кг).

Наши разработки также показали перспективность подхода к созданию высокоэнергоемких АБ с большим сроком службы при работе вне гермоотсека КА, заключающемся в использовании ЛИА габарита 18650 индустриального назначения в сочетании с оптимальными конфигурациями АБ [11]. Сегодня благодаря развитию литий-ионных технологий емкость таких аккумуляторов достигает 3 и более А·ч. Соответственно, на их базе можно создавать высоконадежные отказоустойчивые АБ с удельной энергоемкость до 150 Вт·ч/кг со сроком службы более 5 лет для низко- и среднеорбитальных КА (рис. 5).



Рис. 5. Литий-ионные аккумуляторные батареи АО «Корпорация «ВНИИЭМ»: *a* – АБ 30В/40Ач, *б* – АБ 30В/120Ач

Заключение

1. В последнее десятилетие прогресс в области перезаряжаемых источников тока связан с развитием технологий литий-ионных аккумуляторов, для которых на серийных изделиях достигнуты значения удельной энергоемкости, превышающие 250 Вт·ч/кг и 650 Вт·ч/л.

2. Создание высокоэнергоемких отказоустойчивых перезаряжаемых источников тока для космических применений сегодня может быть ориентировано только на использование литий-ионных аккумуляторов.

3. На основе индустриальных литий-ионных аккумуляторов габарита 18650 в АО «Корпорация ВНИИЭМ» разработаны и успешно прошли испытания батареи с удельной энергоемкостью до 150 Вт·ч/кг.

Литература

1. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Ходненко В. П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – т. 114. – №4. – С. 15 – 26.

2. Груздев А. И. Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных и стационарных применений // Инновации. – 2014. – № 3 (185). – С. 12 – 20.

3. http://www.quallion.com.

4. http://yardney.com/lithium-ion-2.

5. http://www.saftbatteries.com/market-solutions/space.

6. http://gsyuasa-lp.com/lse-gen27. http://saturn.kuban.ru.

7. Y.Borthomieu, D.Reulier. VES16 Cell and Battery Design. Nasa Battery Workshop, Hunstsville, 6th-8th November 2012, S3094 – 12.

8. http://abslpower.com.

9. Chris Pearson, David Curzon, Rob Spurrett, Ka Lok Ng. The ABSL 100-150Ah Lithium-Ion Batteries Provided To NASA For The SDO and LRO Programs // Presentation Template Proprietary Information R800040. ABSL Space Products, 2008.

10. Груздев А. И. Концепция построения высокоэнергоемких аккумуляторных батарей для авиационно-космических применений // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 147. – № 4. – С. 38 – 44.

КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Д. А. Кобец, А. М. Матвеев, А. А. Прошин, А. А. Мазуров (ИКИ РАН)

Аннотация. В работе рассматривается опыт применения технологий Business intelligence (BI) для построения уровня контроля и анализа работоспособности систем автоматизированной обработки спутниковых данных. Приведены примеры интерактивных отчетных форм для анализа статистических данных, ориентированных на разные задачи и используемых для оперативного выявления неполадок в цепях обработки. Особое внимание уделено описанию функционирования блока контроля (в том числе OLAP-кубов (online analytical processing), являющихся его важной частью). Рассматриваются особенности собираемой с вычислительных узлов статистической информации об их состояниях.

Ключевые слова: анализ спутниковых данных, системы дистанционного мониторинга, параллельные вычисления, автоматическая обработка данных, обработка данных дистанционного зондирования, ВІ-технологии, OLAP, интерактивная отчетность, отчетные формы.

Введение

В условиях современного многообразия национальных и международных систем ДЗЗ, увеличивающейся области применения данных спутникового мониторинга, роста количества потенциальных потребителей этих данных и тематических продуктов на их основе возникает необходимость построения систем приема, обработки и хранения спутниковой информации, а также различных данных, полученных с ее помощью. Объем и темпы роста количества подобной информации определяет одно из основных требований к таким системам – максимальная автоматизированность и независимость от оператора. При этом одним из наиболее важных направлений развития подобных систем является оптимальное использование вовлеченных в нее вычислительных ресурсов, что в свою очередь особенно остро ставит задачу контроля процессов приема, обработки и хранения спутниковых данных.

В настоящей работе представлено описание подходов, схем организации и инструментария на основе ВІ-технологии для анализа информации о работе распределенных комплексов обработки спутниковых данных. Данные подходы и инструменты сегодня фактически являются частью технологии автоматизированной обработки спутниковых данных, созданной и развиваемой в ИКИ РАН [2]. В настоящее время данные подходы и инструменты используются в различных системах автоматизированной обработки спутниковых данных, в том числе в центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [3].

Особенности организации систем автоматизированной обработки спутниковых данных и задачи контроля работоспособности ее элементов

Комплексы обработки спутниковых данных, создаваемые и поддерживаемые ИКИ РАН, имеют блочную архитектуру [2], так как подобная архитектура является наиболее удобной для дальнейшего масштабирования, развития и поддержки. В такой схеме каждый блок, проектируемый под решение определенного спектра задач, имеет описанный интерфейс, по средствам которого осуществляется взаимодействие с другими блоками системы. При этом, достаточно сложная система, содержащая в себе большое количество блоков, находящихся на разных уровнях иерархии, может поддерживаться большим сообществом программистов, зачастую находящихся удаленно друг от друга.

Система обработки спутниковых данных имеет в своем составе следующие основные уровни:

1. Уровень подготовки данных. К этому уровню относятся блоки формирования комплектов файлов для обработки, которые являются уникальными для каждой тематической обработки. Они отслеживают полноту и комплектность необходимых данных и формируют очередь готовых заданий.

2. Уровень формирования заданий. На нем для сформированных комплектов данных определяются задания для их обработки, которые уже передаются на вычислительные комплексы, проводящие обработку. На этом уровне, в том числе:

 а) отслеживается максимально допустимое одновременное количество выполнений комплектов, относящихся к заданию одного типа;

b) наличие свободных вычислительных ресурсов;

c) производится мониторинг количества комплектов, переданных на обработку данных (в том числе для того, чтобы предотвратить загрузку всех мощностей выполнением одного типа заданий в ущерб выполнению других задания);

d) определяются приоритеты заданий и т.д.

3. Уровень выполнения заданий (обработки). Работа этого уровня обеспечивается распределенными кластерами вычислительных машин («обработчиков»). Следует отметить, что из-за постоянного увеличения объемов обрабатываемых данных и формируемых на их основе тематических продуктов возникает необходимость постоянного наращивания используемых вычислительных ресурсов, в том числе и увеличения числа используемых «обработчиков». Поэтому задача контроля используемых вычислительных ресурсов на данном уровне стоит особенно остро. Каждая вычислительная машина, задействованная в кластерах обработки, обычно находится под управлением унифицированного комплекта программ, что позволяет легко расширять парк обрабатывающих компьютеров. Каждый «обработчик» может выполнять несколько комплектов одного задания, которые он берет вместе с заданиями (сценариями) на обработку с серверов-диспетчеров заданий. Ход обработки каждого комплекта документируется в базе данных уровня контроля.

4. Уровень контроля и управления. На этом уровне агрегируется информация о ходе процессов обработки со всех блоков системы, что позволяет операторам, используя, в том числе, и инструменты ВІ-аналитики, оперативно выявлять и устранять неполадки, обеспечивая работоспособность системы в реальном времени.

Таким образом, получается логически разграниченная на уровни схема (рис. 1) с удобным и достаточно понятным управлением потоками обработки. В рамках системы управления легко и единообразно добавляются новые процедуры, наращиваются мощности для обработки и обновляется программное обеспечение. Система контроля позволяет в реальном времени через WEB-интерфейс производить анализ хода обработки за выбранный промежуток времени (на каких обработчиках производилась обработка, количество удачных и ошибочных обработок и т. п.).



Рис. 1. Схема автоматизированной обработки спутниковых данных

Принимая во внимание структуру уровней системы обработки спутниковых данных, перед системой контроля и управления распределенными комплексами обработки встает следующий перечень задач:

1. Организовать контуры документирования процессов от всех блоков, входящих в состав системы для сбора статистической информации, характеризующей их работу.

- 2. Сформировать оперативно пополняемые архивы статистической информации.
- 3. Структурировать накопленную в архивах статистическую информацию.
- 4. Представить результаты в виде удобных интерактивных отчетов.

Архитектура построения системы контроля, управления и инструментов анализа данных

На всех этапах обработки спутниковых данных, контуры документирования процессов от всех уровней системы автоматизированной обработки пополняют архивы статистической информации уровня контроля и управления. В этих архивах накапливается обширная статистика, содержащая значения параметров, характеризующих ход обработки. В сутки в базах данных контроля и управления подобных записей образуется десятки тысяч. Без специальных механизмов и инструментов оператор естественно не может провести их эффективный анализ. Поэтому должны быть решены задачи структурирования накопленной информации и представления результатов в виде различных удобных интерактивных отчетов. ВІ-технологии [6], которые использовались нами для решения этих задач, позволяют на основе единого механизма создавать широкий спектр интерактивных инструментов для анализа различной информации, представляемой пользователю в виде отчетов (таблиц, графиков и карт). Одной из основных особенностей таких технологий является то, что они позволяют быстро строить различные динамичные отчеты. Это позволяет пользователю самому решать, какие анализируемые данные должны быть представлены ему, а также позволяет определять вид и состав этих данных. Для реализации такой возможности собранная информация должна пройти агрегацию и на ее основе должны быть сформированы OLAP-кубы.

Организация блока автоматизированного сбора данных о работе ресурсов и ПО обработки данных

Для осуществления контроля над системой обработки спутниковых данных, в блоке автоматизированного сбора данных организованны контуры документирования процессов от блоков на всех ее уровнях. Перечень контролируемых параметров,

однозначно характеризующих работу каждого уровня, логически вытекает из решаемых уровнем задач:

1. Уровень подготовки данных:

а) наличие исходных данных для формирования комплектов файлов на обработку;

b) количество комплектов, которое возможно сформировать;

с) количество уже сформированных комплектов.

2. Уровень формирования заданий:

а) типы заданий, для которых сформированы комплекты файлов на обработку;

b) количество сформированных комплектов файлов на обработку;

с) количество комплектов, находящихся в данный момент в обработке;

d) количество комплектов, обработка которых может быть начата (исходя из их приоритета и максимально возможного количества комплектов, обработка которых одновременна разрешена);

е) количество успешно обработанных комплектов;

f) количество ошибочно обработанных комплектов.

3. Уровень выполнения заданий:

а) для каждого процесса, участвующего в обработке комплекта;

b) время начала и окончания;

Код возврата;

а) Лог ошибок;

b) Строка системного вызова.

Родитель процесса – процесс, внутри которого был инициализирован данный процесс.

В обработке какого комплекта участвовал данный процесс.

В какой последовательности процессы следовали друг за другом при обработке данного комплекта.

К какому типу заданий принадлежит данный комплект.

На каком обработчике происходила обработка данного комплекта.

Обработка каких комплектов происходила на обработчике параллельно с данным.

Блоки документирования параметров уровней подготовки данных и формирования заданий представляют из себя интерпретируемые программные сценарии, располагающиеся на сервере контроля и управления. Данные программные сценарии запускаются в фоновом режиме в бесконечном цикле. Посредством сетевого протокола прикладного уровня для удаленного доступа к файлам (SMB), запрашивается перечень контролируемых параметров комплектов файлов, которые заносятся в архивы статистической информации в базы данных контроля и управления.

Работа блока документирования параметров уровня выполнения заданий (Рис. 2, где Source SRV – сервер заданий, хранящий наборы файлов и сценарии их обработки; Handler – обработчик обрабатывающий комплекты в соответствии со сценариями обработки; Result SRV – сервер результата, осуществляющий прием результата обработки комплектов файлов; Control DB – база данных уровня контроля) заключается в том, что в соответствии со своей конфигурацией, исходя из приоритета и наличия сформированных наборов, обработчик выбирает комплекты файлов какого задания и в каком количестве он способен начать обрабатывать, после чего закачивает их вместе со сценариями обработки с сервера заданий.



Все сценарии обработки строятся на основе универсальной библиотеки подпрограмм [1]. Программные элементы, входящие в состав данной библиотеки позволяют унифицировать и упростить процесс создания сценариев обработки, а также организовать сбор контролируемых параметров, характеризующих обработку и занесение их в архивы статистической информации.

Организация хранения и интеграции информации для предоставления данных инструментам анализа

Контуры документирования процессов заносят информацию в базы данных статистических архивов. База данных представляет из себя шесть связанных таблиц:

 – «procs» – таблица, содержащая описание всех обработчиков (Идентификатор обработчика, Имя обработчика, Описание, Количество оперативной памяти, Время введения обработчика в эксплуатацию);

 – «proc_task» – таблица, регламентирующая комплекты файлов каких заданий на каких обработчиках могут быть обработаны (Идентификатор обработчика, Идентификатор задания);

– «tasks» – таблица, содержащая описание всех видов заданий (Идентификатор задания, Название задания, Описание, Набор параметров задания для конфигурирования обработчика, Сервер хранения исходных комплектов файлов на обработку, Сервер хранения обработанных комплектов, Путь к директории, содержащей исходные файлы для обработки, Приоритет задания, Предположительное время максимального выполнения задания, Количество оперативной памяти, требующейся для обработки одного комплекта файлов задания, Предположительное время выкладки новых комплектов файлов для обработки, Максимальное количество одновременно работающих над заданием обработчиков, Количество готовых к обработке комплектов файлов, Количество комплектов файлов, находящихся в обработке в данный момент, Количество удачно обработанных комплектов, Количество ошибочно обработель с обработанных комплектов, Количество ошибочно обрабокомплектов, Количество обработанных комплектов, Количество одноврабокомплектов обработанных комплектов, Количество ошибочно обрабокомплектов обработанных комплектов, Количество ошибочно обрабокомплектов обработанных комплектов, Количество одновение в рамение комплектов обработанных комплектов, Количество обработке в данный момент, Количество удачно обработанных комплектов, Количество ошибочно обработанных комплектов, Время прошедшее с выкладки на обработку последнего комплекта);

– «session», «thread» и «process» – таблица для документирования параметров уровня выполнения заданий [1].

Перед тем как собранные параметры, хранящиеся в архивах статистической информации, можно будет анализировать в интерактивных отчетных формах, их необходимо агрегировать, сформировав на их основе OLAP-кубы.

ОLАР-куб представляет из себя многомерный массив, созданный из соединенных таблиц архивов статистической информации, структурированных по многомерному принципу. Куб имеет преимущество в скорости обработки запросов по сравнению с обычными реляционными базами данных, в которых сложные многотабличные запросы выполняются относительно медленно. Высокая скорость выполнения запросов достигается за счет того, что в центре схемы хранения данных в OLAP-кубе располагается таблица ключевых фактов, по которым делаются запросы. К таблице ключевых фактов присоединено множество таблиц с измерениями, показывающими как факты могут быть проанализированы. Специфика построения OLAP-кубов, являющихся источником данных для интерактивных инструментов анализа уровня контроля и управления системы автоматической обработки спутниковых данных, заключается в том, что в качестве фактов выступают показатели количества и продолжительности, характеризующие либо обработку комплекта файлов в целом, либо отдельные процессы обработки. Измерения, в разрезе которых анализируются данные факты, представляют из себя множество различных показателей, таких как: время старта, время финиша, сервер, поставляющий комплекты на обработку, сервер, принимающий результат обработки, тип задания и т. д.

Преобразование статистической информации, предоставляемой контурами документирования процессов и хранящейся в реляционных базах данных, в OLAP-куб, являющийся источником информации для интерактивных инструментов анализа, осуществляется посредством многотабличных SQL запросов. В зависимости от объема анализируемой информации OLAP-кубы могут формироваться как «на лету», так и постоянно храниться на сервере и пополняться по мере появления новых статистических данных.

Построение инструментов анализа данных

Объемы статистической информации, получаемой контурами документирования процессов, настолько высоки (порядка десятков тысяч записей в сутки), что без инструментов анализа человек не в состоянии сформировать на их основе адекватную картину хода процессов обработки данных дистанционного зондирования. Под инструментами анализа, в данном случае, понимаются интерактивные отчетные формы, посредством которых производится оценка статистической информации за установленный промежуток времени. Интерактивная отчетность является гибким инструментом, настраиваемым под решение широкого круга задач, характер которых зависит от особенностей анализируемой информации. Поэтому для проведения комплексного анализа, необходимо создать целый класс инструментов, каждый из которых будет направлен на решение задач различного уровня. Работу любой отчетной формы обеспечивает ее прототип, представляющий собой XML-файл разметки, содержащий в себе описание всех необходимых для ее функционирования параметров и алгоритмов агрегации анализируемой информации.

Описание баз данных. Так как анализируемая информация располагается в базах данных, то прототип отчета должен содержать в себе параметры, характеризующие

ee (IP-адрес узла, на котором располагается база данных, тип базы данных установленных на этом узле (MySQL, PostgreSQL, Oracle и т. п.), имя пользователя, пароль, имя базы данных, перечень таблиц).

SQL запросы. Специфика информации, которая необходима для решения определенного круга задач, отражается в SQL запросе, посредством которого статистические данные становятся доступными для анализа. Каждый инструмент интерактивной отчетности анализирует данные, полученные специализированным SQL запросом. Спецификой SQL запросов в BI-аналитике является то, что они должны иметь возможность запрашивать данные, зависящие от каких-либо параметров, определяемых пользователем (например статистические данные только за определенный период времени, только для определенного вида заданий и т. п.). В теле SQL запроса параметр представляет собой строку, выделенную знаками «\$», которая при формировании отчета заменяется на значение параметра, указанного пользователем. Параметр может иметь разные типы (строка, логический, целое, вещественное, дата/время). Также параметр может принимать заранее определенный перечень значений, представляемых пользователю перед формированием отчета (посредством раскрывающегося списка). Более подробно это раскрывается в следующем разделе «Трансформации».

Трансформации. Чтобы иметь возможность анализировать данные, возвращаемые SQL запросами, их подразделяют на ключевые факты (то, Что анализируется) и измерения (то, в разрезе Чего проводится анализ ключевых фактов). В большинстве случаев измерения представлены ни реальными названиями измерений, а их идентификаторами. Трансформации позволяют дополнительными SQL запросами выбрать данные, устанавливающие связи между идентификаторами и соответствующими им названиями.

	+ •	Задание	 O6pa6 	отчик 👻	Сервер рес	. 🕶	Ce •	• 3 •	Статус 🕶	Дата 👻	
	1	259		BLADE_06_GZ		MODISFS		0	empty session	19.06.17	
	2	36		BLADE_06_GZ		193.232.9.48		0,51	success	19.06.17	
	3	259		BLADE_06_GZ		MODISES		0	empty session	19.06.17	
	4	39		BLADE_06_GZ		193.232.9.48		0,13	success	19.06.17	
	5	39 259		BLADE_06_GZ		193.232.9.48		mrsatdb 0,13	success	19.06.17 19.06.17	
a).	6			06_GZ	MODISFS		Modisfs 0		empty session		
	+ +	Задание 👻	Обрабо	✓ Ce	рвер рес 👻	Cep.	. • 3	Вагру 👻	Статус 👻	Дата 👻	
	1	Calc vegetation indexes from AQUA weekly composite (session)	BLADE_06	_GZ MC	DISFS	Modis	sfs O)	empty session	19.06.17	
	2	Lance Modis products day (session)	BLADE_06_GZ 193.23		.232.9.48 mrsat		tdb 0,51		success	19.06.17	
	3	Calc vegetation indexes from AQUA weekly composite (session)	BLADE_06_GZ MOD		DISFS Mode		sfs 0		empty session	19.06.17	
	4	Lance Modis products night (session)	BLADE_06_GZ 193		93.232.9.48 m		tdb 0,13		success	19.06.17	
	5	Lance Modis products night (session)	BLADE_06_GZ 193		93.232.9.48 mrsa		tdb 0,13		success	19.06.17	
б).	6	Calc vegetation indexes from AQUA weekly composite (session)	BLADE_06	_GZ MC	DISFS	Modia	sfs 0)	empty session	19.06.17	

Рис. 3. Результат выполнения SQL запроса до (а) и после (б) применения трансформации

На рис. 3 показаны результаты выполнения SQL-запроса до и после применения трансформаций. Но возможности трансформаций значительно шире, чем простая замена идентификатора измерения его названием. Трансформация также поддерживает: преобразование строк в url-адреса, назначение определенных цветов для каждого значения измерений, сортировку измерений в соответствии с их значениями.

Интерактивный отчет. После того как SQL запрос настроен и к нему применены все необходимые трансформации, на основе информации, которую он возвращает, создается интерактивный отчет (или OLAP-отчет). Самыми основными настройками отчета являются: какие из столбцов данных будут измерениями, а какие фактами нового отчета, а также, будет ли OLAP-куб отчета формироваться на лету, или если для выполнения SQL-запроса требуется значительное время, отчет будет оперировать данными из заранее сформированного OLAP-куба, обновляемого внешними процедурами по мере необходимости.

Измерения отчета – это данные, в разрезе которых происходит анализ фактов. При создании OLAP-отчета все измерения считываются из OLAP-куба (который строится на основе данных, полученных в результате выполнения SQL-запроса) без возможности их дальнейшей модификации и создания производных измерений. Модификация данных, выступающих в качестве измерений, возможна только на этапах: формирования SQL-запросов, применения трансформаций к результатам выполнения SQL-запросов. В случае с форматами данных дата/время имеется возможность создать производное измерение при формировании OLAP отчета (год, месяц, день, неделя года, день недели, время, часы, минуты, секунды и т. п.)

Факты отчета – это данные, для анализа которых и создается отчет. Так как только на этапе формирования OLAP-куба определяется, какие данные, полученные в результате выполнения SQL-запроса, будут фактами, а какие измерениями, то данные для фактов могут быть так же модифицированы посредством трансформаций. Кроме фактов, полученных напрямую в результате выполнения SQL-запроса, имеется возможность создавать производные факты, вычисляемые на основе существующих фактов и измерений по средствам широкого набора алгоритмов.

Для построения самого отчета необходимо определить:

 – какие именно факты (из числа полученных в результате выполнения SQL-запроса и их производных) необходимы для построения отчета;

– в разрезе каких измерений эти факты будут представлены. В случае двумерного графика с плоской кривой есть только одна ось (чаще всего ось абсцисс), по которой отложены значения измерения (каждому из которых соответствуют значения фактов), остальные измерения в графике могут быть представлены неявно, в виде фильтров, либо в виде дополнительных кривых. Если отчет представляет из себя таблицу, то измерения могут быть отложены как по колонкам (т. е. каждая колонка соответствует определенному значению измерения), так и по столбцам, либо не явно в виде фильтров. В данном случае измерения могут быть вложены друг в друга, т. е. образовывать иерархию строк и иерархию столбцов.

Структура интерактивных отчетов, используемых при анализе хода обработки спутниковых данных. Исходя из структуры контролируемых параметров, по которым контуры документирования процессов накапливают статистическую информацию, инструменты контроля работоспособности комплексов потоковой обработки спутниковых данных делятся на 3 вида:

1. Инструменты анализа хода выполнения различных видов заданий обработки спутниковых данных.

2. Инструменты контроля работоспособности вычислительных узлов системы потоковой обработки спутниковых данных.

3. Инструменты анализа конфигурации элементов системы потоковой обработки спутниковых данных.

В качестве примера работы с формами интерактивной отчетности, рассмотрим ситуацию, возникающую в системе автоматической обработки спутниковых данных в момент введения в эксплуатацию нового обработчика.

При введении в эксплуатацию нового обработчика необходимо удостовериться в том, что обработка комплектов файлов разрешенных типов заданий происходит на

нем корректно. Для этого лучше всего подходит инструмент анализа в виде интерактивной таблицы, отображающей агрегированные ключевые факты, количественно характеризующие ход обработки в разрезе измерения «Статусов» (по горизонтали) и иерархии измерения «Тип задания» и «Обработчик» (по вертикали). Если отфильтровать факты по измерению «Обработчиков», оставив только контролируемый, то полученная таблица будет содержать факты, характеризующие типы заданий, выполненных именно на этом обработчике (Рис. 4, *a*).

Видно, что за анализируемое время контролируемый обработчик выполнил 6 типов заданий. Причем ошибочно были выполнены комплекты, относящиеся к типу заданий «snap_stream_ew(session)». Чтоб понять, является ли типичным такое соотношение удачно обработанных комплектов файлов для данного типа задания к ошибочным, необходимо убрать фильтр с измерения «Обработчиков» и проанализировать, как комплекты данного типа заданий обрабатывались на других обработчиках (Рис. 4, *б*).

	Задания 🕴 🎗	Обработчики 🕴 🎗	Количество удачных потоков	Количество ошибочных потоков	Количество пустынх сессий	Количество crash потоков	Количество незавершенных потоков
	calc vegetation indexes from aqua weel	kly composite (session)	0	0	6	0	0
	🕀 calculate mean ndvi from sin aqua modi	isfs (session)	18	0	0	0	0
	calculate mean ndvi from sin modisfs (second second s	ession)	2	0	0	0	0
	← create 4dc v05 terra (session)		32	0	0	0	0
	create am ds 6 collection (session)		0	0	1	0	0
			4	1	0	0	0
	🕀 egorovs aqua weekly slide mosaic v05 (session)	6	0	0	0	0
	+ lance modis products day (session)		0	0	2	0	0
a).	Iandsat hotspots oper (session)		0	0	1	0	0
	snap_stream_ew(session)	CASTOR	46	10	438	0	0
	Задания 🕴 🏹	Обработчики 🕴 🗸	Количество удачных потоков	Количество ошибочных потоков	Количество пустынх сессий	Количество crash потоков	Количество незавершенных потоков
	oper 4dc interpolation modis (session)	5	0	10	0	0	
	resurs p geoton products owner (sessio	n)	0	0	1	0	0
	resurs p ntsomz gsa products owner (se	ession)	0	0	1	0	0
		ssion)	0	0	1	0	0
	+ resurs p ntsomz mr products_owner (se	ession)	0	0	1	0	0
	snap_stream(test)		0	0	1	0	0
	snap_stream_ew(session)		46	10	438	0	0
			162	1	0	0	0
		PROC_U1_DL1	142	1	0	0	0
		PROC_U1_DL2	212	1	0	0	0
		PROC_U1_DL3	242	0	0	0	0
		PROC_U1_NATASHA	223	0	0	0	0
		PROC_U1_YULIA	250	1	1	0	0
E 1	🛨 sst for landsat oper (session)		5 562	0	33	0	0
0).	🕀 sst smis (session)		0	0	1	0	0

Рис. 4. Интерактивный инструмент анализа статистики выполненных заданий до (δ) и после (a) применения фильтра по измерению обработчиков

Можно наблюдать, что такое соотношение не является характерным, и ошибочно обработанные комплекты файлов для данного типа заданий обычно (на других обработчиках) составляют менее 1% от числа удачно обработанных комплектов. Таким образом, проанализировав данную интерактивную таблицу и применив всего лишь один фильтр, становится очевидно какой, тип заданий некорректно отрабатывается на контролируемом обработчике.

Заключение

Следует отметить, что до внедрения блоков контроля и контуров документирования процессов, единственная информация, доступная в системе, характеризующей ход обработки, – это факт наличия ошибочно обработанного комплекта файлов. Не представлялось никакой возможности проанализировать полноту использования вычислительных ресурсов или выявить причины, препятствующие обработке комплектов файлов, так как система вообще не располагала никакой связанной с этим статистической информацией и инструментами ее анализа. После внедрения блоков контроля генерируемая ими интерактивная отчетность, позволяющая анализировать статистическую информацию, передаваемую контурами документирования процессов, предоставляет исчерпывающие сведения о ходе обработки спутниковых данных, что позволяет выявлять в цепях автоматической обработки ошибки более высокого уровня, обнаружение которых до внедрения системы не представлялось возможным. Оперативное устранение всех выявленных ошибок позволило повысить эффективность обработки данных, что положительно повлияло на уменьшения сроков их доставки к потребителю. Возможность контроля, предоставляемая системой, позволяет расширить в будущем парк имеющихся вычислительных машин.

На данный момент система внедрена в сервисах анализа данных спутниковых наблюдений для оценки и мониторинга возобновляемых биологических ресурсов «ВЕГА-Science» (http://sci-vega.ru/) и «Вега-PRO» (http://pro-vega.ru/) [4].

Работа выполнялась при поддержке ФАНО в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация No. 01.20.0.2.00164).

Литература

1. Кобец Д. А., Матвеев А. М., Мазуров А. А., Прошин А. А. Организация автоматизированной многопотоковой обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. – Т. 12. – № 1. – С. 145 – 155.

2. Лупян Е. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Кобец Д. А., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А., Флитман Е. В., Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 53 – 75. 3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 263 – 284.

4. Лупян Е. А., Савин И. Ю., Барталев С. А., Толпин В. А., Балашов И. В., Плотников Д. Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. – Т. 8. – № 1. – С. 190 – 198.

5. Е. А. Лупян, В. П. Саворский, Ю. И. Шокин, А. И. Алексанин, Р. Р. Назиров, И. В. Недолужко, О. Ю. Панова Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. – Т. 9. – № 5. – С.21 – 44.

6. Н. Паклин, В. Орешков Бизнес-аналитика. От данных к знаниям. СПб.: Питер. 2009. – С. 184 – 192.

Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. приложение за 2017 год

Материалы пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли»

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано в печать 18.12.2017. Формат 70 ×100 1/16. Печ. л. 19. Тираж 100 экз.

Адрес редакции: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 105187, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вольная, д. 30. E-mail: vniiem@vniiem.ru.

Отпечатано в ООО «САМ-ПОЛИГРАФИСТ», г. Москва, Волгоградский просп., д. 42, корп. 5. Тел.: (495)545-37-10. www. onebook.ru

© АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017