

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

3/2010

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

**СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ**

**Филиал ФГУП "ГНПРКЦ
"ЦСКБ-ПРОГРЕСС"-
"ОКБ "СПЕКТР"**

ISSN 1684-2634



9 771684 263005 >

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Научно-технический журнал
№ 3/2010

Издается с 1999 года
Выходит четыре раза в год

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Ю.Б. ЗУБАРЕВ

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:
В.В. ВИТЯЗЕВ, В.П. ДВОРКОВИЧ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Б.А. Бабаян, Ю.И. Борисов,
С.А. Грибачев, Г.В. Зайцев, Р.В. Зубарев,
А.П. Кирпичников, М.И. Кривошеев,
Н.А. Кузнецов, М.С. Куприянов, А.А. Ланнэ,
В.Г. Мистюков, С.Л. Мишенков,
А.А.Петровский, Ю.Н. Прохоров,
А.Н. Соловьев, Ю.Г. Сосулин,
В.В. Шахильдян, Ю.С. Шинаков

Адрес редакции:

107031 Москва, Рождественка, 6/9/20, стр. 1
Тел.: (495) 621-06-10, (495) 621-16-39
Факс: (495) 621-16-39
E-mail: nto.popov@mtu-net.ru
tor@rgrta.ryazan.ru
http://www.dspsa.ru

Для писем:

129090 Москва, а/я 48.

Издатель:

Российское научно-техническое общество
радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова
Компьютерная верстка: А.Л. Витязева
Дизайн: Н.С. Осипова

Подписной индекс по каталогу

ОАО «Роспечать» – 82185

Подписано в печать 22.10.10 г.

Формат 60х90/8.

Гарнитура «Arial». Печать офсетная.

Бумага офсетная. Печ.л. 6,5. Тираж 700 экз.

Заказ № 6167. Отпечатано в
ООО НПЦ «Информационные технологии»
Рязань, ул. Островского, д. 21/1
тел.: (4912) 98-69-84

Издание зарегистрировано в Министерстве
Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1488
от 14.01.2000

УЧРЕДИТЕЛИ:

ЗАО «Инструментальные системы»
ФГУП «НИИ радио»

В НОМЕРЕ:

Везенов В.И., Светников О.Г.

Автоматизация наземных испытаний РКН на основе
современного архитектурного подхода и новых
информационных технологий 3

Везенов В.И., Пресняков А.Н.

Организация информационных обменов и интеграция
данных в распределенных интегрированных
автоматизированных системах управления
технологическими процессами 9

Иванов А.В., Корячко В.П., Сериков С.А.

Анализ влияющих факторов и построение системы
поддержки принятия решений при испытании РКН на
основе многокритериальной оптимизации 13

Новиков Ю.А., Тимашев А.В., Филаткин С.В.

Оценка эффективности систем сбора, передачи и
обработки измерительной информации реального
времени 17

Лукашов Н.А., Петров П.И.

Организация вычислительного процесса обработки и
анализа преддетекторного телеметрического сигнала
при проведении контроля ТМИ стандарта IRIG 21

Тишкин Р.В.

Мягкие вычисления в задачах сегментации космических
изображений 25

Еремеев В.В., Зенин В.А.

Статистические модели коррекции структурных
искажений на спутниковых изображениях земной
поверхности 30

Еремеев В.В., Князьков П.А., Козлов Е.П., Москвитин А.Э.

Технологии анализа и оценки качества космических
изображений 37

Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И.

Информационная технология
стереофотограмметрической обработки видеоданных от
многоматричных сканирующих устройств 44

Товпеко А.В.

Архитектура системы графического представления
измерительной информации в реальном времени при
обеспечении пусков изделий РКН 50

Добычин Н.Н., Стругалев О.В., Франк Е.Б.

Комплекс программно-технических средств для
геофизических работ по освоению ресурсов мирового
океана 59

Атаманчук Ю.И., Луковников К.Б., Фалеев О.В.

Использование методов кластерного анализа
измерительной информации для оперативного и
своевременного выявления нештатных ситуаций при
испытаниях изделий ракетно-космической техники 63

Светников О.Г., Симкин В.В.

Совершенствование модулей сопряжения
программируемых логических контроллеров 66

Красовский А.А.

Цифровая обработка в ZETLAB при идентификации
параметров сейсмического сигнала 70

Подписной индекс по каталогу
ОАО «Роспечать» – 82185



Федеральное государственное унитарное предприятие «Особое конструкторское бюро «Спектр» создано в 1970 году в системе министерства Высшего и среднего специального образования РСФСР. В 2004г. Указом Президента РФ №1009 внесено в перечень стратегических предприятий ОПК, а первого января 2009 года в соответствии с Указом Президента от 16.06.2008г. №956 вошло в качестве филиала в состав интегрированной структуры Роскосмоса ФГУП "Государственный научно-производственный ракетно-космический центр "ЦСКБ-ПРОГРЕСС", являющимся мировым лидером в создании ракетно-космических систем.

Начало деятельности ОКБ характеризуется интенсивным развитием в стране работ в области создания ракетно-космической техники (РКТ) и формированием первого тематического направления "Автоматизация испытаний ракетно-космической техники", в рамках которого был разработан ряд автоматизированных систем «ИКАР-111», «ЦНА» для отработки опытных образцов ракетноносителей, создаваемых конструкторским бюро "Южное" г. Днепропетровск под руководством генерального конструктора академика В.Ф. Уткина, в том числе всемирно известного ракетного комплекса

"Воевода" (за рубежом, получившим название "Сатана") и боевого ракетного железнодорожного комплекса. Внедрение этих систем в КБ "Южное", Южном машиностроительном заводе, космодроме "Байконур" позволило существенно повысить качество и объективность контроля, сократить сроки и стоимость наземной отработки изделий РКТ. Заложенная методология проектирования на основе агрегатно-модульного принципа и базового обеспечения стала основой для разработки последующих систем и комплексов. В числе их: комплексы для автоматизации испытаний для отработки и обеспечения пусков отечественных ракетноносителей "Н1", "Протон-М", "Союз-2", "Зенит", «Рокот», «Ангара» и др.; ракетноносителей, разработанных в рамках международных проектов «Морской старт», "Наземный старт", "Корейская система запуска", "Гвианский космический центр". В настоящее время предложенные автоматизированные технологии и системы для их реализации востребованы в проекте создания космодрома "Восточный", в программах по модернизации космодромов "Байконур" и "Плесецк", межвидового полигона "Капустин Яр".

Одновременно, в кооперации с Рязанским государственным радиотехническим университетом, начало развиваться тематическое направление по созданию программно-аппаратных комплексов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в рамках которого решаются задачи межотраслевой обработки данных ДЗЗ, анализа и улучшения качества изображений, создания электронных каталогов данных ДЗЗ и обеспечения сетевого доступа к ним, обработки информации от гиперспектральной аппаратуры; оценки тактико-технических характеристик систем ДЗЗ на основе статистического анализа космических снимков, тематической обработки материалов космической съемки. Создано семейство программно-аппаратных комплексов обработки данных ДЗЗ, которые получили эффективное применение в рамках космических проектов «Метеор-Природа», «Венера - 13,14», «Космос», «Мир», «Океан-О», «Ресурс-О1», «Сич-1М и др. В настоящее время создаются комплексы обработки данных высокодетальной съемки от космических систем «Ресурс-П» и систем специального назначения разработки ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", а также аппаратно-программные средства для контроля и отработки систем ДЗЗ в процессе их изготовления и подготовки к пуску на космодромах РФ.

С середины 90-х годов в ОКБ интенсивное развитие получили работы по созданию современных информационно-аналитических систем различного назначения на базе бурно развивающихся в мире информационных и телекоммуникационных технологий. В данном направлении можно отметить разработку для МО РФ информационно-аналитической системы по обеспечению комплексного контроля выполнения международных договоров в области сокращения и ограничения вооружения, а также создание информационно-аналитической системы технической безопасности уничтожения химического оружия в Российской Федерации во исполнение международной Конвенции «О запрещении химического оружия».

Весомый этап в жизнедеятельности ОКБ - участие в научно-технических программах по исследованию и освоению Мирового Океана. Создана и установлена на 50 судах Мингео СССР и Академии наук система сбора, регистрации и обработки данных сейсмогидроакустических исследований с целью поиска минеральных ресурсов на шельфе (нефть, газ) и в глубоководных районах (железомарганцевые конкреции) Мирового Океана. Использование этих систем позволило открыть ряд крупных месторождений полезных ископаемых и закрепить в ООН часть территории Мирового Океана за Российской Федерацией для дальнейших разработок полезных ископаемых в XXI веке.

За время существования предприятие разработало и внедрило в промышленную и войсковую эксплуатацию свыше 150 автоматизированных систем и комплексов. На базе разработок ОКБ защищены 47 докторских и кандидатских диссертаций; получено около 500 авторских свидетельств и патентов на изобретения. 36 сотрудников за высокие результаты выполненных работ отмечены правительственными наградами; двум сотрудникам присвоено звание лауреатов Государственной премии.

Коллектив ОКБ «Спектр» за 40 лет своего существования доказал свою сплоченность и самоотверженность, умение решать важные государственные научно-технические задачи, в том числе и в сложных условиях, уверен в будущем предприятия и результатах его работы.

**Заместитель генерального директора ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» -
директор – главный конструктор филиала «ОКБ «Спектр», к.т.н.,
Лауреат государственной премии СССР**

В.И. Везенов

УДК 629.7

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ РКН НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО АРХИТЕКТУРНОГО ПОДХОДА И НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Везенов В.И., заместитель генерального директора ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - директор-главный конструктор филиала «ОКБ «Спектр», к. т. н., лауреат Государственной премии СССР, meandr@spectr.ryazan.ru
Светников О.Г., заместитель директора – первый заместитель главного конструктора филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», к. т. н., заслуженный изобретатель РФ, meandr@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: архитектурный подход, автоматизированная система управления технологическими процессами наземных испытаний, базовая модель технологического процесса автоматизированных наземных испытаний, комплекс агрегатных базовых технических и информационно-программных средств, программируемые логические контроллеры.

Эффективность и качество отработки и эксплуатации новых образцов ракетно-космических комплексов в определяющей степени зависит от объема и достаточности испытаний при изготовлении, подготовке к пуску и непосредственно летной отработке ракет космического назначения (РКН). Существенную роль играют наземные испытания РКН, целью которых является достоверное определение и всесторонняя оценка параметров и характеристик и доведение их до значений, заданных в нормативно-технической документации [1]. В результате обеспечивается выявление и устранение конструкционных, технологических и производственных дефектов до осуществления пуска изделия, а также адекватное моделирование процессов функционирования систем ракеты и оценка реализуемости характеристик РКН в соответствии с комплексной программой экспериментальной отработки на ранних этапах до пуска изделия.

В условиях ограничения финансирования, сокращения количества образцов, выделяемых для испытаний, увеличения объема и сложности обрабатываемой информации с одновременным уменьшением времени на принятие решений, повышения интеллектуальных возможностей ракетной техники возникла потребность в обеспечении качественно нового уровня автоматизации процессов наземных испытаний РКН на базе новых информационных технологий.

Такая задача требует современного системного подхода к разработке и созданию средств и систем для обеспечения автоматизации процессов отработки и испытаний опытных образцов составных частей и РКН в целом. До последнего времени преобладал задачный подход в создании таких средств, когда разработчиками агрегатов, головным разработчиком и изготовителями РКН и наземного технологического оборудования (НТО) практически независимо друг от друга создавались различные узкоспециализированные комплексы и программные средства, обеспечивающие отработку, контроль и испытания на этапах изготовления, предварительных и полигонных испытаний. В этих условиях

Рассматривается современный архитектурный подход к созданию интегрированной автоматизированной системы управления технологическими процессами наземных испытаний, предназначенной для контроля и испытаний узлов, агрегатов и ракет космического назначения в целом на этапах их отработки на стендах главных конструкторов, контрольно-испытательных станциях заводов-изготовителей, технических и стартовых комплексах. Предлагается базовая модель технологического процесса автоматизированных наземных испытаний и комплекс агрегатных базовых технических и информационно-программных средств для реализации АСУ ТП. Приводится описание комплексов средств автоматизации, созданных для реализации наземных электроиспытаний РКН "Протон-М".

уровень унификации по проекту был невелик, а затраты на их создание и эксплуатацию существенны.

Предлагается современный архитектурный подход к созданию интегрированной автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) наземных испытаний, предназначенной для контроля и испытаний узлов, агрегатов и РКН в целом на этапах их отработки на стендах главных конструкторов, КИС заводов-изготовителей, технических (ТК) и стартовых комплексах (СК) космодромов.

Такой подход позволяет реализовать принципы проектного управления [2,3], организовать комплекс взаимосвязанных работ по проведению наземных испытаний различными предприятиями разработчиков и производителей на основе базового обеспечения и современных информационных технологий, в том числе CALS(ИПИ)-технологий, под координацией (управлением) предприятия генерального конструктора РКН.

В общем случае предлагаемая интегрированная АСУ ТП структурно должна представлять собой территориально распределенную 3-х уровневую систему.

Первый – нижний технологический уровень (стенды разработчиков, цехов и участков заводов-изготовителей, технические и стартовые комплексы космодромов) должен быть реализован на базе унифицированного набора программируемых логических контроллеров (ПЛК), объединенных промышленными коммутаторами или коммуникационными контроллерами. На данном уровне решаются вопросы сопряжения, сбора и предварительной обработки информации от объектов контроля.

Второй – верхний технологический уровень предприятий и полигонов реализуется в виде локальных вычислительных сетей (ЛВС), включающих в свой состав рабочие станции испытателей, специалистов и руководителей работ, серверы, средства интегрального коллективного отображе-

ния и связи с предприятиями головного разработчика и соисполнителями, участвующими в реализации проекта создания РКН. На данном уровне решаются задачи контроля, диагностики и испытаний узлов и агрегатов РКН.

Третий уровень – уровень организационного управления головного предприятия. Структурно реализуется аналогично второму уровню. На данном уровне выполняются функции проектного управления созданием РКН, аккумулируются и анализируются результаты испытаний всех составных частей и РКН в целом, осуществляется информационная поддержка при разрешении возникающих нештатных ситуаций, формируются и пополняются исходные данные для систем подготовки и принятия решений (СППР), вводятся, актуализируются и архивируются технические и организационные документы в электронном виде, систематизируются результаты испытаний для дальнейшего статистического анализа.

При создании предлагаемой интегрированной АСУ ТП должен быть применен современный архитектурный подход, получивший в последнее время широкое признание как основа методологии разработки сложных компьютерных систем [4]. Такой подход наряду с концепцией базового обеспечения гарантирует целостное многоаспектное представление о создаваемой системе, обеспечивает её естественную интеграцию в среду предприятий, создающих РКН, предоставляет возможности эффективного развития и интероперабельности со смежными системами.

Анализ состава работ по созданию сложных автоматизированных систем на базе действующих (ГОСТ 34) и новых (ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207, ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288) нормативных документов показывает, что все они подразумевают создание архитектур трех основных видов: архитектура деятельности, логическая архитектура (системная архитектура в терминах схемы Дж. Захмана), физическая (техническая или технологическая) архитектура [5].

Основой архитектуры деятельности является анализ технологических и организационных процессов на всех этапах наземных испытаний, который должен выполняться специалистами разработчиками и испытателями РКН и системными аналитиками АСУ ТП. Архитектура деятельности включает схемы классификации и модели процессов контроля, диагностики, испытаний, информационных ресурсов и потоков, необходимых для осуществления наземных испытаний, а также определение организационных структур, способов размещения и регламентов деятельности специалистов и руководителей испытаний.

Системная архитектура определяет свойства и основные характеристики проектируемой АСУ ТП, описания прикладных систем и сервисов, предоставляемых испытателям, специалистам, эксплуатантам и руководителям испытаний, описания информационных объектов и структур измерительной информации и результатов контроля, способов их использования и топологии размещения без привязки к конкретным технологическим решениям и формулируются требования к физической архитектуре.

Физическая архитектура определяет аппаратные и программные платформы, ОС, СУБД, ПО промежуточного слоя, сетевое ПО, сетевую и телекоммуникационную инфраструктуру, а также профили технических стандартов, которые будут использоваться при физической реализации системной архитектуры и обеспечивать работу прикладных систем [6].

На основе концепции базового обеспечения для реали-

зации архитектур интегрированной АСУ ТП проектируется комплекс агрегатных средств для наземных испытаний в составе базовых технических средств, базовых информационно-программных средств и методического обеспечения.

Базовое обеспечение разрабатывается на основе типизации и унификации методов и средств решения задач наземных испытаний. Несмотря на то, что наземная отработка осуществляется по множествам частных программ с использованием различных методик, по которым оцениваются сотни характеристик и десятки тысяч параметров, технические средства, применяемые для контроля, диагностики и испытаний блоков, агрегатов и РКН в целом, во многом инвариантны и используют ограниченный по номенклатуре набор источников информации [7].

Типовой минимальный набор базовых технических средств для обеспечения наземной отработки содержит:

- ПЛК для ввода и предварительной обработки ТМИ;

- ПЛК для ввода и предварительной обработки нетелеметрируемых параметров;

- ПЛК для формирования и выдачи дискретных команд управления;

- ПЛК для формирования и выдачи аналоговых команд управления и стимулирующих воздействий;

- Типовые вычислительные комплексы на базе промышленных ЭВМ;

- Телекоммуникационные средства и средства связи;

- Средства коллективного отображения;

- Средства регистрации высокоинформативных потоков информации;

- Источники бесперебойного питания и т. п.

При необходимости набор дополняется оригинальными техническими средствами для сопряжения с объектом управления и наземным испытательным оборудованием.

ПЛК совместно с различными датчиками, исполнительными механизмами для реализации регулирующих и управляющих воздействий представляют нижний технологический уровень АСУ ТП, осуществляющий сбор и предварительную обработку информации о параметрах технологического процесса наземных испытаний, управление исполнительными механизмами, решение задач автоматического логического управления бортовыми системами и наземным технологическим оборудованием, что существенно снижает требования к пропускной способности каналов связи и вычислительной нагрузки средств обработки на следующем (втором) уровне. ПЛК реализуются по классической схеме и включают в свой состав модуль электрического сопряжения с объектом испытаний или наземным технологическим оборудованием, модуль предварительной обработки с программируемым ППЗУ с использованием ПЛИС-технологии, модуль сопряжения с ЛВС. В состав ПЛК может быть включен модуль регистрации первичной измерительной информации. К ПЛК предъявляются жесткие требования по надежности, времени реакции на события, происходящие на объекте, по технологической независимости и применению отечественной элементной базы.

Наиболее специфичным для данной предметной области является ПЛК для ввода и предварительной обработки ТМИ, которые обеспечивают электрическое сопряжение с радиотелеметрическими системами (типа БРС-4, РТС-9, "Орбита" и др, а также их модификациями), декоммутацию телеметрического кадра, форматирование данных и привяз-

ку их к временной шкале единого времени, предварительную обработку по снижению избыточности телеметрической информации, фильтрации для отбраковки аномальных измерений, восстановлению синхронизации и идентификации сбойных кадров. Реализация остальных ПЛК возможна с использованием коммерчески доступных промышленных модулей отечественного и зарубежного производства с учетом ограничений по технологической независимости и применимости ПКИ.

Второй уровень реализуется в виде рабочих станций испытателей, технологов и руководителя работ на базе промышленных ЭВМ и стандартного телекоммуникационного оборудования с использованием технологий "клиент-сервер" и "файл-сервер". Для отображения хода технологического процесса, оперативного управления в штатных и нештатных режимах целесообразно использовать сегментированное табло коллективного пользования, позволяющее повысить эффективность командной работы испытателей сложных агрегатов и РКН в целом, особенно при разрешении нештатных ситуаций. На данном уровне осуществляется сбор и регистрация данных от локальных ПЛК, синхронизация работы и поддержание единого времени в системе, управление ходом испытаний и отображение состояния технологического графика, обработка измерительных данных в соответствии с методиками контроля и анализа состояния объекта, формирование оперативного заключения "норма-ненорма", итогового отчета, соответствующего раздела электронного паспорта, исходной информации по пополнению раздела базы данных по нештатным ситуациям.

Базовое информационно-программное обеспечение включает в себя системное программное обеспечение; прикладное программное обеспечение; инструментальное программное обеспечение; информационное обеспечение.

В состав системного программного обеспечения входят:

- операционные системы;
- системы управления базами данных;
- драйверы стандартных устройств;
- программные средства защиты информации (антивирусы, криптошлюзы, межсетевые экраны);
- утилиты (дефрагментатор диска, программы мониторинга оборудования);
- программные средства технического обслуживания системы.

Прикладное программное обеспечение включает специальное программное обеспечение и офисное программное обеспечение.

Специальное (функциональное) программное обеспечение предназначено для автоматизации различных аспектов деятельности специалистов и испытателей, решения функциональных задач контроля и испытаний, а также для реализации технологического процесса испытаний, обеспечивающего взаимодействие объекта управления с различными уровнями АСУ ТП и расчетом испытателей.

Офисное программное обеспечение используется для подготовки организационно-технических документов и отчетов по испытаниям и содержит текстовые и графические редакторы, редакторы электронных таблиц, редакторы видеоматериалов и т.п..

Для проведения автоматизированного анализа параметров РКН и его составных частей при наземных испытаниях минимальный базовый набор программных модулей

должен содержать:

- модули контроля параметров по принципу "НОРМА-НЕНОРМА", реализующие алгоритмы контроля уровня, мощности параметра, длительности событий, заданной последовательности событий и интервалов времени их формирования, числа штатных и нештатных переходов параметра и т.п.;

- модули статистического анализа, обеспечивающие сравнение получаемых результатов с данными предыдущих пусков;

- модули корреляционного анализа, обеспечивающие определение и оценку зависимости одного параметра от другого.

Инструментальное программное обеспечение, предназначенное для использования в ходе проектирования, разработки и сопровождения продукции, управления процессом должно включать:

- средства моделирования и проектирования;
- среды разработки;
- CASE-средства (средства комплексной автоматизации технологического процесса анализа, проектирования, разработки и сопровождения продукции);
- CALS-средства (средства информационной поддержки жизненного цикла продукции);
- SCADA-системы (диспетчерское управление и сбор данных).

Для промышленных АСУ ТП широко применяются коммерчески доступные SCADA-системы [8], а для рассматриваемой предметной области в последнее время вызывает интерес использование среды графического программирования типа IN LabVIEW фирмы National Instruments [9]. Данные продукты позволяют с использованием дружественного пользовательского интерфейса осуществлять процедуры сбора, обработки и управления объектами испытаний. Однако в наших приложениях применение SCADA-систем и продуктов фирмы NATIONAL INSTRUMENTS весьма ограничено из-за отсутствия сертификации, приемки заказчика, открытых исходных текстов и привязки к техническим средствам конкретных производителей. Поэтому для подготовки и проведения наземных испытаний встает задача разработки базового оригинального проблемно-ориентированного комплекса для подготовки, планирования, проведения испытаний, который должен обеспечивать:

- подготовку сеансов и процедур наземных испытаний с использованием дружественного пользовательского интерфейса без реального программирования;

- оперативное изменение сеансов и циклограмм испытаний;

- информационную поддержку испытателей при разрешении нештатных ситуаций;

- сбор и предварительную обработку измерительной информации;

- регистрацию информации и всех событий, возникающих в процессе испытаний;

- хранение информации с возможностью ее постобработки через интерфейс с использованием в АСУ ТП баз данных в режиме диалога с испытателями;

- интегральное отображение хода испытаний и визуализация информации в виде мнемосхем, графиков, таблиц и т.п.

Информационное обеспечение включает в себя совокупность решений и данных по хранению информации и её пре-

доставлению потребителям, задействованным в технологической цепочке наземных испытаний, и включает в себя нормативную базу по проведению испытаний, базу технических документов, статистические данные, классификаторы информации по различным аспектам деятельности, структуры хранения информации, рубрикаторы нештатных ситуаций и т.п.

Основными документами методического обеспечения являются:

- Методики контроля параметров и характеристик приборов, устройств и агрегатов РКН.
- Методические указания по разрешению нештатных ситуаций.
- Учебно-методические пособия по программированию и эксплуатации АСУ ТП.
- Должностные инструкции операторов, испытателей, технологов, экспертов-аналитиков и руководителей расчетов, обеспечивающих проведение наземных испытаний.

Анализ реализуемых функций на различных этапах показал, что характер наземных испытаний в значительной степени совпадает при их проведении на КИС ЗИ, ТК и СК. В системе измерений различных ракет используется типовой набор датчиков и измерительных бортовых приборов, радиотелеметрических систем. Нормативная база, методология проектирования и технологии наземных испытаний на различных предприятиях космической отрасли являются идентичными.

На основе данных положений предлагается базовая модель технологического процесса автоматизированных наземных испытаний (Рис. 1), предусматривающая последовательный итерационный процесс испытаний на КИС заводов изготовителей, ТК и СК в интегрированной информационной среде с подготовкой и отработкой технологической и программной документации на стендах и КИС ЗИ и переда-

че ее в электронном виде на ТК и СК космодромов.

Функционально базовый техпроцесс инвариантен от места проведения испытаний (КИС ЗИ, ТК и СК) и его целесообразно разделить на три фазы:

- подготовка исходных данных;
- проведение испытаний (контроль параметров, реализация технологического графика, представление, регистрация результатов обработки, измерительной и технологической информации);
- анализ и подготовка отчетных документов.

Исходными данными для реализации первой фазы является конструкторская, технологическая, эксплуатационная и методическая документация. Предлагается для эффективного обеспечения процессов наземной отработки ввести в обращение в качестве технологического документа электронный паспорт изделия (ЭПИ), формируемый по технологии баз данных на предприятии разработчике и пополняемый (корректируемый) на всех этапах наземных испытаний. ЭПИ содержит следующие основные разделы: раздел формуляра по ГОСТ; раздел каталога изделия по ГОСТ; раздел эксплуатационной и технологической документации; раздел рубрикатора нештатных ситуаций; разделы, связанные с результатами наземных испытаний.

На данной фазе используется комплекс средств подготовки исходных данных, минимальный состав которого должен содержать язык формализованного описания процесса объекта (структуры телеметрической системы и источников информации), конструктор сеансов и циклограмм испытаний, графический объектно-ориентированный редактор с набором анимационных функций, библиотеку программ контроля, диагностики и обработки параметров, формы и шаблоны представления результатов испытаний.

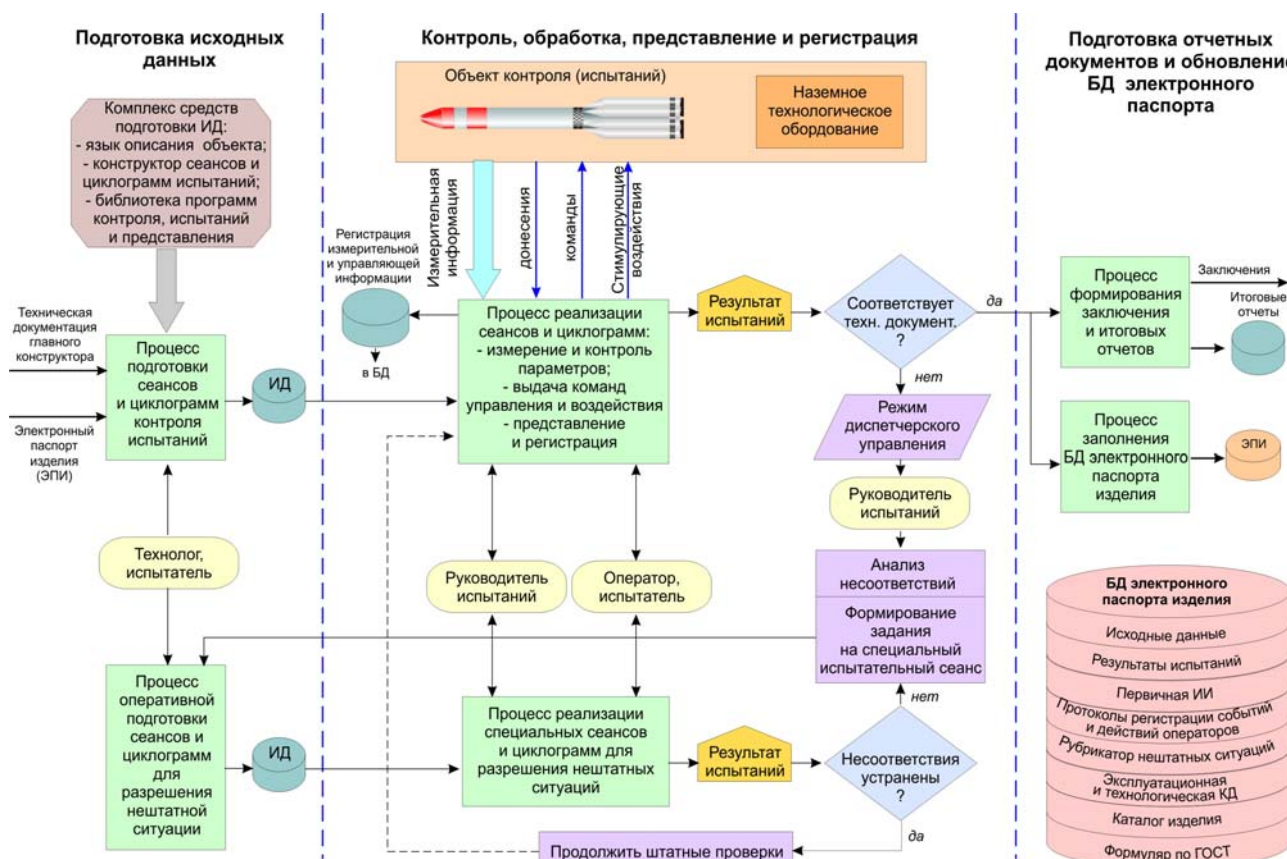


Рис. 1. Базовая модель технологического процесса автоматизированных наземных испытаний

Подготовленные в соответствии с заданной штатной технологией, зафиксированные в документации главного конструктора, исходные данные в виде программы сопровождают изделие, вводятся в КСА, корректируются (при необходимости) и заносятся в ЭПИ на всех фазах наземных испытаний.

На фазе проведения испытаний под управлением исполнительной системы осуществляется автоматический контроль параметров, выдача команд управления, прием и обработка реакций изделия в соответствии с предварительно подготовленными сеансами и циклограммами испытаний. Вся первичная измерительная информация и реакции объекта на команды управления регистрируются на ЖМД и в последующем заносятся в ЭПИ. В штатном режиме руководитель расчета испытаний осуществляет контроль выполнения технологического графика и интегральный контроль за состоянием объекта. При положительных итогах реализации сеансов испытаний выдается заключение по результатам испытаний по заданной форме и осуществляется переход к фазе подготовки отчетных документов.

При возникновении несоответствий исполнительная программа осуществляет в разрешенных точках перевод системы в режим диспетчерского управления, при котором все последующие действия определяет руководитель расчета. Руководитель расчета анализирует возникшую нештатную ситуацию и принимает решение о продолжении штатных проверок или к переходу к процессам исследования и установления причин выявленного несоответствия. Для информационной поддержки руководителю расчета и аналитикам предоставляются следующие сервисы:

- возможность повторения штатных проверок в автоматизированном режиме с остановкой процесса в заданных оператором точках с переходом при необходимости на ручной режим;
- вызов на экран необходимой эксплуатационной и технологической документации, рубрикатора нештатных ситуаций;
- возможность оперативной подготовки и прогона специальных испытательных сеансов и циклограмм с рабочих мест руководителя и испытателей;
- выбор и прокрутка необходимых архивных трендов для просмотра в графическом виде аналогичных параметров, зарегистрированных на предыдущих этапах наземных испытаний.

После выявления и устранения несоответствия осуществляется занесение необходимых данных в ЭПИ, в том числе пополняется рубрикатор нештатных ситуаций.

Основные фрагменты предлагаемой технологии и построения АСУ ТП наземных испытаний апробированы при автоматизации наземных электроиспытаний РКН "Протон-М" [10].

Для поддержки базового техпроцесса автоматизированных электроиспытаний разработаны и установлены на стендах и КИС предприятий ГКНПЦ им. Хруничева, НПЦ АП, ТК и СК Космодрома "Байконур" комплексы средств автоматизации (КСА) на базе унифицированного ряда типовых аппаратно-программных модулей. КСА реализованы на базе УСО, устанавливаемых вблизи объектов контроля, и ЛВС, объединяющей рабочие мес-

та испытателей, операторов и руководителя работ.

УСО включает в свой состав ПЛК для ввода и предварительной обработки ТМИ; ПЛК для ввода и предварительной обработки телеметрируемых параметров; ПЛК для формирования и выдачи дискретных команд управления; ПЛК для формирования и выдачи аналоговых команд управления и стимулирующих воздействий.

Для реализации технологических процессов электроиспытаний предусмотрены инструментальные программные средства формализованного описания процесса испытаний, позволяющие технологу (испытателю) без привлечения программистов в предметно-понятном интерфейсе осуществлять конструирование логической схемы сеансов испытаний; формировать описание телеметрической системы и источников информации, описание тарировочных характеристик, определять необходимые алгоритмы контроля параметров и характеристик бортового и наземно-технологического оборудования.

Для удобства пользователей разработаны пополняемые библиотеки программ, реализующих алгоритмы обработки, контроля и диагностики узлов, агрегатов и приборов изделия; типовые формы и шаблоны представления и регистрации результатов испытаний в виде графиков, таблиц, гистограмм, диаграмм, мнемосхем; база данных для хранения исходных данных и результатов испытаний, технической и организационно-технической документации, необходимой для информационной поддержки процессов электроиспытаний, в том числе для разрешения нештатных ситуаций.

Подготовленные исходные данные формируются в электронном виде, становятся частью документации Генерального конструктора и сопровождают изделие на всех стадиях жизненного цикла. Все исходные данные, измерительная информация и результаты обработки сохраняются после каждого этапа испытаний в электронном архиве и могут быть использованы при анализе качества создаваемых изделий, разрешения нештатных ситуаций, возникающих в процессе наземных испытаний, и подготовке итоговых отчетов.

На стендах Главных конструкторов и заводах изготовителей АСУ ТП наземных испытаний интегрируются с АСУ предприятия, а на космодромах являются составной частью АСУ подготовки и пуска.

Аналогичные технологии и КСА для проведения электроиспытаний РКН "Союз-2", "Союз-СТ" применяются в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», космодромах "Плесецк" и "Байконур", космодроме Куру" Гвианского космического центра.

Таким образом предлагаемый подход к построению интегрированной АСУ ТП наземных испытаний и технологии ее применения для создаваемых новых образцов РКН позволяет реализовать:

- интегрированную информационную среду, обеспечивающую эффективное информационное взаимодействие в рамках разграничения доступа всем должностным лицам и специалистам полигонов, предприятий-разработчиков и изготовителей, участвующим в проведении наземных испытаний;
- дружественный пользовательский интерфейс, интуитивно понятный должностным лицам и специалистам, обеспечивающий их эффективную работу по подготовке и

проведению наземных испытаний без учета специфики вычислительных и телекоммуникационных средств;

- цветокодированное интегрированное отображение и представление на различных этапах наземных испытаний как на экранах рабочих станций, так и на табло коллективного пользования предприятий, ТК, СК;

- информационную поддержку специалистов при возникновении нештатных и аварийных ситуаций за счет оперативного доступа к информационным ресурсам: ЭД и КД в электронном виде, диагностическим подсказкам, систематизированному опыту по архиву результатов предыдущих испытаний аналогичных изделий;

- электронный документооборот организационно-технической документации между космодромом и предприятиями разработчиков и изготовителей с использованием CALS (ИПИ) технологий и CALS средств;

- высокий уровень автоматизации всех элементов инфраструктуры испытательных баз предприятий разработчиков и изготовителей с возможностью как децентрализованного, так и централизованного управления со стороны предприятия генерального конструктора РКН;

- комплексы средств автоматизации на базе унифицированных вычислительных и телекоммуникационных средств, сертифицированных в РФ и разрешенных к применению в ВВТ;

- модульную структуру прикладного (специального) программного обеспечения, реализуемая на основе согласованных внутрипрограммных и межпрограммных интерфейсов и позволяющую упростить процессы программирования, обеспечить параллельную разработку, доработку и дополнение программных комплексов без изменения установленного на объекте программного обеспечения;

- автоматическое документирование действий должностных лиц, влияющих на процессы выполнения работ, регистрация и архивация измерительной и технологической информации, результатов испытаний.

Литература

1. Меньшиков В.А. Полигонные испытания. М.: КОСМО. 1997, с. 416
2. Воропаев В.И. Управление проектами в России. М.: АЛАНС. 1995, с. 225
3. Везенов В.И., Светников О.Г., Таганов А.И. Основы процессно-ориентированного управления проектами информационных систем. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 2002, с.324
4. Federal Enterprise Architecture Framework. Version 1.1 September 1999
5. Зиндер Е.З. Современный архитектурный подход и его практическое применение в рамках старых и новых стандартов проектирования. М.: Фонд ФОСТАС. 2005, с. 44
6. Зиндер Е.З., Коголовский М.Р. Базовый глоссарий терминов по архитектуре обобщенного предприятия и электронного правительства. М.: Фонд ФОСТАС. 2005
7. Олейник И.И., Суворов А.В., Пискунов А.А. Натурная обработка сложных технических комплексов. М.: НАУКА, 1990, с.239
8. Андреев Е.Б. Куцевич Н.А. Синенко О.В., SCADA – системы: взгляд изнутри. М.: РТСофт, 2004, с.176
9. Технологии для авиации ракетно-космической техники. National Instruments. ni.com/russia.
10. Везенов В.И., Светников О.Г., Тимашев А.В., Иванов А.В. Опыт создания систем автоматизации испытаний систем измерений и электроиспытаний изделий ракетно-космической техники. Радиотехнические тетради №33, 2006, с.38-42

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемый коллега!

Приглашаем Вас принять участие в работе 13-ой Международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA'2011», которая состоится в Москве в ИПУ РАН 30 марта - 01 апреля 2011 года

ОРГАНИЗАТОРЫ:

- Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова
- IEEE Signal Processing Society
- Российская секция IEEE
- Институт радиотехники и электроники РАН
- Институт проблем управления РАН
- Институт проблем передачи информации РАН
- Московский научно-исследовательский телевизионный институт
- Компания AUTEX Ltd. (АВТЭКС)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Теория сигналов и систем
- Теория и методы ЦОС
- Цифровая обработка многомерных сигналов
- Цифровая обработка речевых и звуковых сигналов
- Цифровая обработка изображений
- ЦОС в системах телекоммуникаций
- ЦОС в радиотехнических системах
- ЦОС в системах управления и робототехники
- Цифровая обработка измерительной информации
- Нейрокомпьютерная обработка сигналов и изображений
- Цифровое телевидение и телевидение
- Цифровое радиовещание
- ЦОС в системах защиты информации
- Проектирование и техническая реализация систем ЦОС
- ЦОС в открытых системах
- Проблемы подготовки специалистов в области ЦОС

УДК 621.317.75

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБМЕНОВ И ИНТЕГРАЦИЯ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Везенов В.И., заместитель генерального директора ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - директор-главный конструктор филиала «ОКБ «Спектр», к. т. н., meandr@spectr.ryazan.ru

Пресняков А.Н., главный специалист филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», к. т. н., 4370@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: распределенные системы, поддержка принятия решений, обмен данными.

Введение

Создание и эксплуатация сложных технических комплексов (СТК), таких, например, как ракетная и космическая техника, характеризуются постоянным усложнением как самих СТК, так и средств их испытаний, технического обслуживания и эксплуатации. Высокая стоимость проектов по созданию, отработке и эксплуатации СТК повышает требования качества к отработке всех их компонентов, а также к организации работ по подготовке к проведению работ с СТК и непосредственно при их эксплуатации. Специфика многих СТК требует скоординированной работы на территориально распределенных объектах. Объективность оценок состояния СТК на различных стадиях жизненного цикла обеспечивается сложными системами измерений, включающими в себя сотни и тысячи разнотипных источников информации: от первичных преобразователей физических величин – датчиков, до сложных, в том числе и бортовых измерительных приборов и специализированных ЭВМ.

При отработке, обеспечивающей выявление и устранение конструкционных, технологических и производственных дефектов, получают, обрабатывают и анализируют данные измерений. Спектр испытаний, цели, методы и средства их проведения постоянно расширяется, они проводятся на заводах-изготовителях компонентов СТК и на объектах, где эксплуатируются СТК и обеспечивающие их системы. С повышением требований к качеству отработки СТК растут объемы измерительной информации (ИИ). Переработать большие объемы ИИ в заданные сроки и с высоким качеством без применения эффективных автоматизированных методов обработки и управления процессом испытаний невозможно [1-3, 10].

Созданы и эксплуатируются контрольно-проверочная аппаратура (КПА) для контроля и испытаний основных компонентов СТК, автоматизированные и автоматические системы управления техпроцессами СТК (АСУ ТП). В отдельных случаях реализуются техпроцессы повышенной опасности (заправка компонентами ракетного горючего ракеты-носителя, работы с химическим оружием в местах их хранения и уничтожения и др.).

Особую значимость для обеспечения безопасности приобретает скоординированная совместная работа персонала различных обслуживающих систем, оперативная комплексная обработка информации, поступающей с различных, в том числе и подвижных, объектов и корректное

Рассматриваются вопросы информационных ресурсов распределенных автоматизированных систем в части организации информационных обменов и интеграции данных.

управление этими системами (в том числе и в нештатных ситуациях). Создаются интегрированные автоматизированные системы управления (ИАСУ), взаимодействующие с рядом КПА и АСУ ТП, распределенных по ряду территориально разнесенных объектов.

Целью создания таких АСУ является сокращение сроков, повышение эффективности и качества функционирования СТК за счет автоматизации, информатизации и координации деятельности должностных лиц и специалистов эксплуатирующих СТК, предприятий-разработчиков и изготовителей компонентов СТК и обслуживающих систем.

В целом подобные системы не укладываются в рамки известных типов АСУ и в соответствии с предъявляемыми требованиями должны функционировать как: информационно-аналитическая система; контрольно-диагностический комплекс; система поддержки принятия решений (СППР); автоматическая и автоматизированная управляющие системы.

Построение современных информационных систем (ИС) напрямую связано с реляционными и объектно-ориентированными базами данных (БД), базами знаний (БЗ) и системами управления БД (СУБД). Технология БД в последнее время утвердилась как основная технология обработки данных в ИС различного масштаба и в системах поддержки принятия решений.

Процессы информационной интеграции происходят во всем мире. В то же время ошибочно автоматически переносить подходы, хорошо зарекомендовавшие себя при создании более простых ИС, в совершенно иную среду территориально распределенных ИАСУ [6]. В территориально распределенных системах задача сбора, консолидации и обработки информации становится одной из самых актуальных и результатом ее решения является своевременное обеспечение необходимой информацией по осуществляемой деятельности руководителей и специалистов, участвующих в работах.

В рассматриваемом случае (для СТК) добавляются также: необходимость доставки ИИ (в частности с ИП, при работах с ракетной техникой) и работа БД в реальном времени, высокие требования к надежности доставки и представления данных. В этих условиях решение задачи обмена данными между территориально удаленными компонентами превращается в сложную проблему.

Сложные процессы подготовки и зачастую высокая степень опасности работ по СТК требует высококачественной их интеграции на верхнем уровне управления, что должно быть адекватно отражено в средствах автоматизации и информатизации ИАСУ и, соответственно, в организации информационных ресурсов системы.

Специфика ИАСУ потребовала от предприятия решения задач научной поддержки организации информационных ресурсов системы:

- развитие методов информационного моделирования для учета специфики потребностей в информационных ресурсах территориально распределенных ИАСУ;
- регламентация прикладных протоколов и интегрируемых ресурсов для ИАСУ;
- разработка протоколов обменов между БД, учитывающих специфику измерительных данных (жесткие требования по времени обменов и т.д.) [11];
- разработка метода и алгоритмов обработки обменных данных (при передаче и приеме) между БД системы;
- разработка моделей оценки показателей качества системы (по надежности, своевременности, полноте, актуальности, безошибочности, корректности представляемой информации и т.п.), учитывающих специфику ИАСУ;
- разработка моделей для интегральных оценок показателей качества ИАСУ;
- разработка встроенной системы поддержки принятия решений (прежде всего для поддержки решений лиц принимающих решения в нештатных ситуациях);
- разработка математических моделей и методов рационализации структур данных ИАСУ (для обеспечения специфических требований, в частности, по режиму реального времени).

Организация информационных обменов и интеграция данных

В связи с особенностью ИАСУ и взаимодействующих с ней систем, большую часть времени их БД должны работать автономно, и СУБД, поддерживающие распределенные БД, в системе не применяют, не используются также методы репликации данных в системе взаимодействующих БД. В то же время, в период функционирования ряда СТК должны проводиться интенсивные обмены данными, и поступающие от различных источников массивы информации должны интегрироваться.

Основу известных методов информационных обменов составляют способы генерации уникальных ключей во взаимодействующих БД, изложенные в [9]. Наиболее перспективным считается способ генерации новых ключей для записей, загружаемых в БД из БД источников. При информационных обменах используется специальная структура метаданных (таблица или несколько таблиц) для хранения соответствий между ключами БД источников и ключами, сгенерированными в БД приемнике, а также процедуры для управления данной структурой.

Недостатком известных методов информационных обменов при применении в ИАСУ является то, что обеспечивается только уникальность записей данных в БД приемнике, когда данные получают от нескольких БД источников. В известных методах не обеспечивается исключение многократного хранения одних и тех же по содержанию данных, по тем или иным причинам повторенных при переда-

че от нескольких источников.

Для БД реального времени ИАСУ предложен [11] метод, исключающий повторные записи данных, которые уже занесены в БД приемника и которые вновь поступают в составе данных от новой БД источника. Обеспечивается также корректное совмещение данных от нескольких БД источников в единый логически связанный информационный массив, что существенно повышает функциональные возможности системы. Реализуется возможность обеспечения информационного обмена не только между БД, образующих иерархию ("подчиненные" БД источники и "центральная" принимающая БД, такая топология интегрируемых информационных ресурсов характерна для большинства известных методов идентификации данных), но и в произвольной структуре взаимодействия БД, предусматривающей сетевую топологию обменов, в том числе и двухсторонних обменов между произвольно взятыми отдельными БД информационной системы (рис.1). Потребность в подобной топологии интегрируемых информационных ресурсов характерна для ИАСУ.

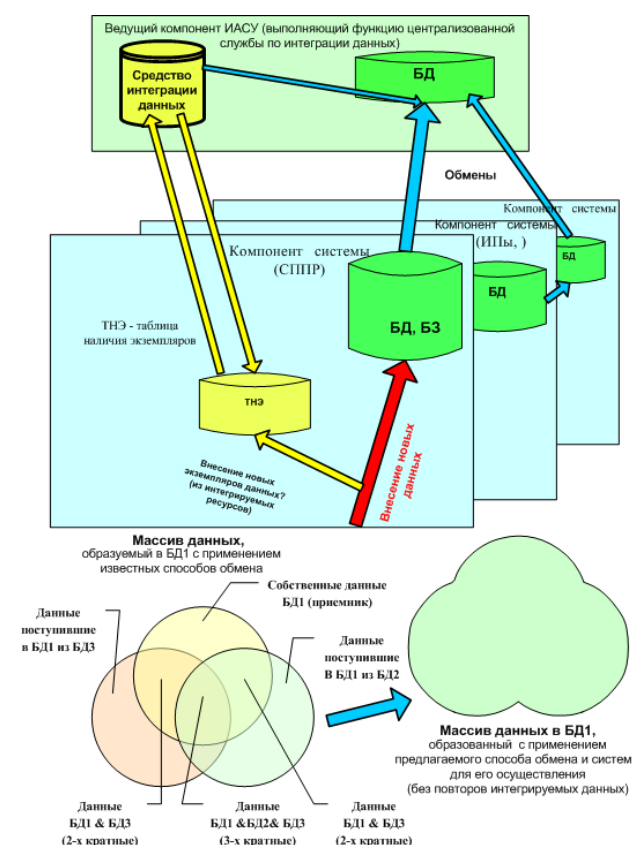


Рис. 1. Обмены данными в ИАСУ

При создании современных систем телекоммуникаций одной из важнейших является задача обеспечения высокой достоверности передачи данных. К наиболее эффективным методам решения данной задачи следует отнести применение корректирующих кодов. Применение помехоустойчивого кодирования в цифровых системах передачи данных позволяет получить энергетический выигрыш кодирования. Энергетический выигрыш можно использовать для уменьшения требуемой мощности передатчика, повышения скорости передачи данных, уменьшения размеров очень дорогих антенн, повышения дальности связи, экономии полосы частот и

улучшения многих других важных свойств систем передачи данных.

В связи с высокой интенсивностью сбоев при передаче данных по спутниковым каналам применение различных методов помехоустойчивого кодирования в практике создания соответствующих систем связи стало обязательным. Развитие методов помехоустойчивого кодирования один из основных факторов, позволивших в отечественных системах спутниковой связи за последнее десятилетие уменьшить вероятность помех с 10^{-6} на передаваемый символ данных до 10^{-8} с одновременным увеличением почти на порядок пропускной способности.

В известных методах передаваемые по каналам связи данные разбивают на блоки. При наличии искажений передаваемых данных используют одну или несколько дополнительных передач блоков данных. При этом по каналу обратной связи передают либо принятые сообщения (системы с информационной обратной связью), либо решение о правильном или ошибочном приеме сообщений (системы с решающей обратной связью). Использование обратной связи обеспечивает высокую достоверность передаваемой информации, но не гарантирует время доставки данных. Такие методы поддерживаются в стандартах на коммуникационные протоколы, в частности, в наиболее распространенном в настоящее время стеке протоколов TCP/IP.

При сборе и передаче значительных объемов ИИ по большому числу параметров СТК необходимы каналы связи со спутниковыми сегментами с передачей данных через один или несколько спутников на геостационарной орбите. Большое время распространения сигнала, обусловленное длиной радиоперехвата земля – спутник – земля и обратно (на обратную связь), усугубляет проблему выполнения требований по времени доставки данных. Часть данных, необходимых для репортажа о поведении СТК и экспресс-анализа данных телеизмерений наиболее значимых параметров, должна передаваться в реальном времени. В этом случае используют коммуникационные протоколы UDP без обратной связи. Время доставки обеспечивается, но не обеспечивается достоверность. Риск потери данных высокий и находится за пределами допустимого уровня.

В [12] предлагается способ повысить надежность доставки данных. Для выполнения требований по достоверности передачи данных помимо использования помехоустойчивого кодирования блоков данных для каждого передаваемого блока данных формируются и передаются один или несколько резервных блоков. Надежность передачи повышается без включения механизмов обратной связи, которые не гарантируют время доставки.

Организация встроенной СППР

При создании и эксплуатации СТК зачастую возникают нештатные ситуации. Часть нештатных ситуаций может привести к катастрофическим последствиям и требует высокого уровня ответственности за принимаемое решение по их своевременному парированию. При эксплуатации СТК нарабатаны сотни вариантов развития нештатных ситуаций с априорно известными признаками их появления. Созданы средства, которые вы-

являют такие признаки, за которыми должно следовать немедленное, в том числе и автоматическое реагирование. В ИАСУ функции выявления и парирования (автоматического и автоматизированного с участием персонала) выполняет встроенная система поддержки принятия решений (СППР).

Современные встроенные СППР реального времени требуют наличия интеллектуальных информационных ресурсов, гармонично интегрированных с информационными массивами других компонентов системы.

В СППР ИАСУ используются:

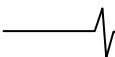
- начальное формирование «знаний», необходимых для выявления нештатных ситуаций и выбора вариантов реагирования (по данным соответствующих эксплуатационных документов /ассоциации, корреляции/; по предшествующему опыту эксплуатации других видов или экземпляров СТК /аналогии/);
- накопление «знаний» по опыту эксплуатации /прецеденты/;
- прием и обработка оперативных данных интегрированного контроля компонентов СТК, поступающих от компонентов ИАСУ;
- выдача координирующих управляющих воздействий для компонентов ИАСУ и на взаимодействующие с ИАСУ КПА и АСУ ТП (в автоматизированном режиме под управлением ЛПР, а в особых случаях и в автоматическом режиме);
- формирование и выдача потоков данных информационной поддержки персонала ИАСУ, ЛПР.

Для работы СППР в реальном времени все данные в БД и БЗ заносятся под управлением централизованной службы интеграции [11].

Концептуальная модель СППР содержит следующие взаимодействующие блоки: блок интерфейса (для приема данных интегрального контроля текущего состояния СТК, выдачи команд управления на компоненты ИАСУ, в том числе и парирования нештатных ситуаций, выдачи данных информационной поддержки персонала и для других видов взаимодействия), аналитический модуль (блок анализа ситуаций, блок принятия решений), база данных, база моделей, база знаний, блок управления реагированием на нештатные ситуации.

Для обеспечения гибкости системы данные в БД и БЗ пополняются в процессе функционирования (подсистема обучения), обеспечивается возможность ввода в систему дополнительных алгоритмов, методов, описание ситуаций, а также ввода известных статистик по принятым решениям в уже известных ситуациях. Пополняются типы, размерности, диапазоны временные и значений параметров, характеризующих текущее состояние СТК.

Для непосредственной информационной поддержки принятия решений оператором при возникновении нештатных ситуаций в процессах подготовки и эксплуатации СТК информация о ходе работ, интегральные данные о текущем состоянии компонентов СТК и обслуживающих систем постоянно поступают в базу данных СППР, производится распознавание ситуаций и занесение их индексов в базу знаний. На основе этих индексов, а также временных характеристик и коэффициентов относительной важности ситуаций, формируются оценки, выявляются не-



штатные ситуации, генерируется вариант(ы) разрешения ситуаций, который определяет относительную последовательность разрешения ситуаций с учетом их важности и срочности. В особых случаях включаются автоматические заранее определенные процедуры реагирования и оповещений. В случаях достаточности временных ресурсов на парирование нештатной ситуации, после их оценки, оператор вводит индекс наиболее важной ситуации в базу данных. По индексу ситуации формируются гипотезы о возможных решениях. На основе индексов гипотез формируются оценки достоверности гипотез, критериальные оценки возможных вариантов реагирования (рекомендации по принятию решения). Вводя команды управления, оператор выбирает вариант парирования нештатной ситуации.

Проблемы автоматизированного диагностического комплекса для комплексной оценки состояния системы и ее компонентов и выявления нештатных ситуаций и выбора варианта реагирования, решаемые аналитическим модулем СППР, достаточно трудоемки. Решаются эти задачи, как правило, методами декомпозиции, аналогично методам системного анализа [4,7]. Выбор варианта из множества альтернатив, оценка правдоподобности выявления нештатной ситуации проводится по различным критериям оптимальности [8] (по функциям полезности [5]).

Многокритериальные оценки используются как при функционировании ИАСУ (в СППР), так и при проектировании компонентов системы, а также при эксплуатации ИАСУ, для оценки целостности системы (для контроля уровня параметров системы и, при необходимости, в процессах восстановления их заданных значений для предотвращения деградации значимых характеристик системы).

Автоматический запуск процедур парирования реализуется в ситуациях априорно известных и однозначно диагностируемых. В ряде случаев искомые решения многовариантны, требуют компромисса и участия в выборе лица, принимающего решения (ЛПР). Такие случаи возникают, когда нештатные ситуации не были известны априорно или происходит наложение ситуаций. В СППР закладываются возможности генерации вариантов реагирования в неполностью определенных ситуациях (в частности, по принципу «аналогий»).

В процессе решений многокритериальных задач ЛПР информационно поддерживается автоматическим формированием набора предпочтений решений X (из множества X), который отражается функцией полезности $F(X)$. Функция полезности $F(X)$ представляется в виде либо линейной скалярной свертки частных критериев $f_i(x)$

$$F(X) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x), \quad (1)$$

либо в виде мультипликативной свертки

$$F(X) = \prod_{i=1}^m f_i^{a_i}(x). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) a_i - весовые коэффициенты, которые могут определяться либо экспертным путем, либо исходя из анализа предъявляемых требований к параметрам (поведению параметра), описываемых кри-

териями $f_i(x)$, либо являются коэффициентами регрессии, имеющими смысл частной производной критериальной функции $f_i(x)$, вычисленной в базовой рабочей точке («чувствительность критерия к изменению учитываемого параметра»).

При проектировании ИАСУ, при поддержке целостности системы в процессе эксплуатации используется мультипликативная свертка, а в СППР при функционировании ИАСУ в различных ситуациях используются оба вида функции полезности.

Заключение

Применение на практике при создании ИАСУ новых способов организация информационных обменов и интеграции данных системы, моделей оптимизации и поддержки принятия решений позволяет значительно улучшить качество работ по подготовке и эксплуатации СТК.

Предложенная СППР позволяет производить выбор алгоритма для решения задачи многокритериальной оптимизации при поддержке управляющих решений. Пополнение данных БД и БЗ СППР позволяет значительно наращивать эффективность ИАСУ.

Литература

1. Меньшиков В.А. Полигонные испытания. Книга I. М.: «КОСМО», 1997.
2. Меньшиков В.А. Полигонные испытания. Книга II. М.: «КОСМО», 1999.
3. Олейник И.И., Суворов А.В., Пискунов А.А. Натурная отработка сложных технических комплексов. М.: Наука, 1990.
4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973.- 344 с.
5. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. – М.: «Наука», 1978. – 352 с.
6. Цимбал А.А., Алешина М.Л. Технологии создания распределенных систем. Для профессионалов. — СПб.: Питер, 2003.
7. Рыков А.С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация. – М.: «МИСИС», Изд. Дом «Руда и металлы», 2005. – 352 с.
8. Ларичев О.И. Теория принятия решений. –М.: Логос, 2000. – 296 с.
9. Лисянский К. Архитектурные решения и моделирование хранилищ и витрин данных // Директор информационной службы. 2002. № 3.
10. Везенов В.И., Светников О.Г., Тимашев А.В., Иванов А.В. Опыт создания систем автоматизации испытаний систем измерения и электроиспытаний изделий ракетно-космической техники. – М.: «ОКБ МЭИ», «Радиотехнические тетради», № 33, 2006.
11. Везенов В.И., Новиков Ю.А., Пресняков А.Н., Светников О.Г., Хлебников Н.Ю. Способ информационного обмена между базами данных информационных систем и система для его осуществления. Патент РФ № 2351010, 27.03.2007.
12. Везенов В.И., Марченков Р. Е., Новиков Ю.А., Пресняков А.Н., Форсов Г. Л. Способ передачи информации по каналам связи в реальном времени и система для его осуществления. Заявка на патент РФ № 2009128929/09(040205) от 27.07.2009.

УДК 621.317.75

АНАЛИЗ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ И ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ РКТ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

*Иванов А.В., заместитель главного конструктора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр»,
meandr@spectr.ryazan.ru*

Корячко В.П., заведующий кафедрой САПР ВС, РГРТУ, д. т. н., проф.

*Сериков С.А., заместитель главного конструктора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр»,
4371@spectr.ryazan.ru*

Ключевые слова: принятие решений, оптимизация систем, функция полезности.

Введение

Создание и эксплуатация новых образцов изделий РКТ (РКН, МБР, БРПЛ, КА) в последние десятилетия характеризуется усложнением, как самих изделий, так и методов и средств их испытаний, сокращением сроков самих испытаний и количества образцов, выделяемых для летно-конструкторских испытаний, повышением требований качества к их отработке и дальнейшей эксплуатации.

Существенной составляющей в повышении надежности и снижении затрат при выводе космических объектов является повышение качества контроля основных элементов и систем ракетно-космической техники (РКТ) на всех этапах жизненного цикла: при изготовлении, подготовке к пуску и пуске. При проведении испытаний в процессе подготовки изделий РКТ к пуску формируются обширные порции информации, описывающие различные ситуации, возникающие при работе с конкретным изделием.

В свою очередь создаваемые технические системы испытаний изделий ракетно-космической техники характеризуются постоянным функциональным усложнением, а также интеграцией различных по типу устройств в один много параметрический технический объект. Постоянные возрастающие требования к достоверности и качеству испытаний объектов РКТ определяют необходимость создания системы принятия решений (СППР).

Постановка задачи оптимизации

Техническая система испытаний предназначена для выполнения определенных функций в процессе испытания изделий РКТ и позволяет получить требуемый эффект в процессе подготовки изделия РКТ. Под техническими системами испытаний изделий РКТ (ТСИ РКТ) будем понимать технические системы, включающие большое число элементов и подсистем, организованные по иерархическому принципу, в которых при данном (конкретном) уровне рассмотрения процесс принятия решения рассмотрен между компонентами системы. При функционировании ТСИ РКТ зачастую возникают нештатные (конфликтные) ситуации. Под подобными ситуациями понимаются такие

Рассматриваются вопросы оптимизации системы испытаний изделий РКТ, описывается математическая модель оптимального определения средств системы.

ситуации, которые возникают в процессе управления, не могут быть решены без участия оперативного персонала и связаны с необходимостью выбора лицом, принимающим решение (ЛПР), конкретной альтернативы управления при наличии информации о состоянии ТСИ РКТ, критериев, решающих правил и собственной системы предпочтений. Конфликтные ситуации связаны с высоким уровнем ответственности за принимаемое решение, характеризуются нестереотипностью и зачастую острым дефицитом времени на принятие решения. Причинами возникновения таких ситуаций могут быть:

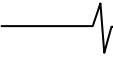
- ненадежность элементов, выход их из строя;
- несовершенство ТСИ РКТ, которое обусловлено неполнотой и неточностью информации об объекте, несовершенством методов и алгоритмов управления, недостатками и ошибками оператора и т.д.;
- необходимость преодоления многозначности, возникающей в процессе функционирования.

Оптимизируя ТСИ РКТ, нельзя забывать о связях, имеющихся между разными звеньями системы и разными уровнями иерархии.

Основной трудностью анализа и синтеза ТСИ РКТ является учет действия случайных факторов в процессе их создания и последующего функционирования. Обобщенным функциональным свойством системы является эффективность, отражающая степень достижения системой цели с учетом затрат ресурсов и времени на реализацию операции в определенной ситуации.

Проблема оценки и оптимизации решений в сложных технических системах и создания надежных диагностических систем для них достаточна, трудоемка и решается, как правило, методами декомпозиции [1, 2].

В общей теории систем под задачей оптимизации и принятия решений понимается пара $(X, F(X))$, где X – множество альтернатив, $F(X)$ – критерий оптимальности. Под решением задачи $(X, F(X))$ понимается альтернатива $x^* \in X$ либо подмножество альтернатив $X^* \subseteq X$, полученных по критерию оптимальности $F(X)$, иногда называемым функцией полезности [3]. Задача



оптимизации сложной технической системы относится к классу задач принятия решений, когда для оценки альтернатив $x \in X$ можно привлекать количественные критерии, допускающие операции в нормализованном критериальном пространстве $Z = R^m$, под которым понимается пространство, координаты которого рассматриваются как оценки по соответствующим критериям (здесь m – количество критериев оптимальности) [2].

Образование множества X в критериальное пространство Z порождает подмножество Zx , являющееся образом множества X

$$X: X \xrightarrow{(f_1(x), \dots, f_m(x))} Zx \subset Z = R^m \quad (1)$$

Опишем проблемную ситуацию многокритериального принятия решений в виде следующей модели:

- существуют альтернативы x , которые обладают m свойствами $z_1, \dots, z_m$;
- каждому свойству z_i альтернативы x соответствует критериальная оценка $f_i(x)$;
- каждой альтернативе x соответствует в пространстве Z решение (точка) $z = (z_1, \dots, z_m) \in R^m$, описываемая вектором $F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$;
- отображение $X \rightarrow Z$ порождает в этом пространстве множество решений Zx , являющееся образом множества X , соответствующее выражению (1);
- на множество решений в критериальном пространстве Z наложены критериальные ограничения, образующие подмножество $Zz \subseteq Z$;
- допустимое множество решений Z_D в критериальном пространстве Z образуется как $Z_D = Zx \cap Zz$;

Особенностью задачи является то, что каждой допустимой альтернативе $x_s \in X$ соответствует точка $z_s \in Z_D$ в критериальном пространстве Z , описываемая вектором $F_s(x) = (f_1^s(x), \dots, f_m^s(x))$.

Формально задачу определения оптимальной структуры программно-аппаратных средств сложной технической системы можно задать следующим образом. Имеется множество X альтернативных структур сложной технической системы, каждая из которых может быть описана вектором критериев $F(x)$. Известно множество D компонент заполнения системы, причем $D = \bigcup D_j$, $j = \overline{1, k}$, где D_j – j -й вариант компоненты (функциональный блок, объективная программа, сервисный узел и др.). Дополнительные условия, определяющие структуру сложной системы: $\{\Phi_j\}$ – множество функций, реализуемых на компоненте D_j , вариант объединения $\bigcup D_j = \{D_j\}$, обладающий функциональной полнотой и др.

Поиск оптимального решения происходит на основании корректно заданной шестерки:

$$\langle X, F(X), Z_D, D, \{D_j\}, \{\Phi_j\} \rangle \quad (2)$$

Формирование функции полезности

Принятие решений $x^* \in X$ или $X^* \subseteq X$ при нескольких критериях $F(X) = \{f_i(x)\}$, $i = \overline{1, m}$ относится к числу трудно формализуемых задач системного анализа.

Искомые решения x^* или X^* по своей природе компромиссны. Поскольку компромисс является прерогативой человека, то многокритериальное решение

полностью зависит от предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР).

В процессе решения многокритериальных задач ЛПР руководствуется своим набором предпочтений, который отражается некоторой функцией полезности $F(X)$ в критериальном пространстве Z_D . Функцию $F(X)$ на всей области определения Z_D получить довольно сложно, поэтому в задачах проектирования часто ограничиваются анализом ее поведения в окрестностях той точки пространства аргументов, которая соответствует наиболее типичной ситуации. Как правило, функция полезности $F(X)$ представляется в виде либо линейной скалярной свертки

$$F(X) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x), \quad (3)$$

либо в виде мультипликативной свертки

$$F(X) = \prod_{i=1}^m f_i^{a_i}(x) \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) a_i – весовые коэффициенты, которые могут определяться либо экспертным путем, либо исходя из анализа предъявляемых требований к параметрам проектируемой системы, описываемых критериями $f_i(x)$, либо являются коэффициентами регрессии, имеющими смысл частной производной критериальной функции $f_i(x)$, вычисленной в базовой рабочей точке.

На практике наиболее применимой для оценки различных вариантов проектируемых систем является линейная скалярная свертка вида (3), которая представляет собой линейное приближение критериальной функции. Область определения коэффициентов $a_i \in \Gamma_a$ представляет собой симплекс

$$\Gamma_a = \{\alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^m a_i = 1\}$$

здесь a_i – формальные параметры, имеющие двоякий физический смысл. С одной стороны – это коэффициенты, выражающие предпочтения ЛПР, а с другой стороны – это коэффициенты содержательной регрессивной модели, построенной на основе концепции нелинейной схемы компромиссов.

Функцию полезности (3) можно представить в виде некоторой содержательной модели в критериальном пространстве Z_D , если ее конструировать в виде функции штрафа. Если в техническом задании на систему задан вектор ограничений $A = (A_i)$, $i = \overline{1, m}$ на параметры, то логично ввести векторную разность $(A_i - f_i(x))$, которую следует максимизировать, т.е. формально реализовать принцип «подальше от ограничений» [3]. Содержательная модель функции полезности ЛПР при минимизируемых критериях примет вид функции штрафа $F(X)$:

$$F(X) = \sum_{i=1}^m a_i [A_i - f_i(x)]^{-1} \quad (5)$$

или в нормированном виде:

$$F_0(X) = \sum_{i=1}^m a_i [1 - f_{0i}(x)]^{-1}, \quad (6)$$

где $f_{0i}(x) = f_i(x) / A_i$.

Если результат решения многокритериальной задачи предназначается для широкого использования без учета интересов ЛПР, то индивидуальные предпочтения нивелируются по статистике. В этом случае становится возможным применение принципа недостаточного основания Бернулли-Лапласа: если априорные вероятности гипотез неизвестны, то их следует положить равными, т.е. все гипотезы следует считать равновероятными. В применении к многокритериальной задаче это означает, что в выражениях (3), (5) и (6) все коэффициенты a_i должны быть равными $a_i = 1/m$, если только нет никаких предварительных данных о предпочтительности критериев. Тогда

$$F(X) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [1 - f_{0i}(x)]^{-1}$$

Учитывая, что согласно теореме Гермейера [5], умножение результатов сравнения на постоянную величину $1/m$ есть монотонное преобразование, которое не изменяет результатов сравнения, можно перейти к следующему выражению для критерия оптимальности

$$F(X) = \sum_{i=1}^m [1 - f_{0i}(x)]^{-1} \quad (7)$$

В формуле (7) элемент субъективности исключен полностью. Этот критерий может быть использован как в задачах анализа, когда при известном решении x^* оцениваются критерии $f_i(x)$ и находится обобщенная оценка $F(X)$, так и в задачах синтеза, когда компромиссно-оптимальное решение x^* определяется как

$$x^* = \arg \min F(X) = \arg \min \sum_{i=1}^m [1 - f_{0i}(x)]^{-1}$$

Реализация СППР

Задачи создания сложных технических систем и надежных диагностических средств для них решаются с применением методов многокритериальной оптимизации. Для задач, возникающих в процессе создания и эксплуатации сложных технических систем, существует множество различных алгоритмов принятия многокритериальных решений и соответственно различных способов адаптации этих алгоритмов.

Анализ существующих алгоритмов и методов показывают, что все они имеют свои недостатки и достоинства [5]. При их использовании в конкретных системах не только приходится учитывать противоречивые требования по обеспечению быстроедействия и точности выбора альтернативы, но и характер самих задач (количество влияющих критериев, их взаимосвязь, относительная важность и т. д.). Это означает, что даже для однотипных задач при разных исходных данных эффективность различных методов не одинакова.

Обобщая известные процедуры принятия решений, для СППР ТСИ РКТ выделим последовательность основных действий, включающую в себя:

1. Анализ проблемы.
2. Поиск альтернатив, определение критериев оптимальности.
3. Анализ и выбор лучшей альтернативы (сравнение альтернатив).

При принятии решений должны быть решены следующие основные задачи:

- упорядочивание альтернатив;
- классификация многокритериальных задач;
- выделение лучшей альтернативы.

Анализ проблем. Формулировка целей и задач. Для реализации первого этапа формулирования и анализа проблемы необходимо осуществить следующие шаги:

- мониторинг внешней среды и объекта управления;
- выявление и формирование проблемы, оценка ее новизны;
- установление взаимосвязи с другими проблемами;
- оценка полноты и достоверности информации по данной проблеме;
- ведение базы данных информационных ресурсов по проблеме.

Полученная информация о существующей проблеме анализируется с целью получения подробных данных о самой системе, выявления общей структуры проблематики и возможности использования ее для определения цели и формулировании задач.

Поиск альтернатив, определение критериев оптимальности.

Необходимым и первым этапом принятия решения является задача выявления перечня альтернатив и структуры критериев.

Анализ и выбор лучшей альтернативы.

В ходе данного этапа необходимо провести оптимизацию альтернатив и выбор наилучшей из множества предложенных, с использованием методологии поддержки принятия решений, включающей разнообразные технологии и методы, которые можно частично или полностью формализовать.

С точки зрения системного анализа к основным этапам анализа альтернативных решений необходимо отнести: анализ неопределенности решения, методы оптимизации и определение решающих функций, оценку возможных решений, выбор оптимального решения.

Концептуальная модель системы поддержки принятия решений (СППР) ТСИ РКТ содержит в себе следующие блоки: блок интерфейса, аналитический модуль (блок анализа проблемы, блок принятия решений), база данных, база моделей, база знаний.

База данных содержит модели распознавания конфликтных ситуаций; формирования плана (последовательности) их разрешения с учетом важности и директивного (допустимого) времени разрешения; генерирования гипотез о возможных причинах конфликтных ситуаций; формирования плана проверки гипотез и реализации решений.

База данных содержит информацию о характеристиках и признаках ситуаций, в том числе признаках появления, возможных причинах возникновения, важности, директивном времени и т.д.

Для обеспечения гибкости системы целесообразно включить в состав СППР дополнительную подсистему обучения, обеспечивающую возможность ввода в систему дополнительных алгоритмов, методов, описание ситуаций, а также ввода известных статистик по принятым решениям в уже известных ситуациях.

Обобщенная структурная схема системы поддержки принятия решений (СППР) представлена на рис.1.

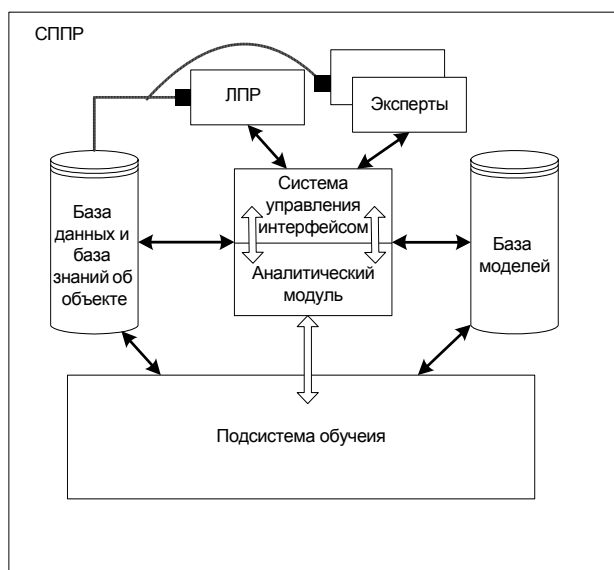


Рис. 1. Структурная схема СППР

Подсистема обучения состоит из блоков обучения распознаванию ситуаций, формирования гипотез о конфликтной ситуации, формирования модели проверки гипотез, блока формирования обстановки, блока анализа эффективности.

Блок формирования обстановки предназначен для формирования типа, размерности и диапазона параметров, характеризующих текущее состояние ТСИ РКТ. Конкретные значения всех или нескольких параметров могут либо генерироваться по отдельному закону, либо соответствовать реальной, либо заданной обстановке. Это позволяет снизить размерность задачи перебора всех возможных вариантов, т.е. проводить оптимизацию и исследования только вблизи наиболее интересных событий.

Блок анализа эффективности предназначен для сравнительной оценке эффективности применяемого алгоритма

Можно выделить три этапа функционирования СППР: Обучение, функционирование, дообучение.

Обучение. На этом этапе формируется база знаний СППР, в которой хранится модель функционирования системы, создаваемая на основе обработки экспертной информации. С помощью подсистемы обучения информация о характеристиках конфликтных ситуаций обрабатывается специальным образом и вводится в базу знаний. Множество признаков, характеризующих факт возникновения конфликтных ситуаций, формируется на основе информации, циркулирующей в системе управления. Эти признаки обычно вполне определены и достоверны, что позволяет автоматически формировать сигнал о факте возникновения конфликтной ситуации.

Описания конфликтных ситуаций формируются на основе анализа целей и задач функционирования системы и экспертной информации. Для каждой

конфликтной ситуации синтезируются структуры моделей формирования гипотез и их проверки.

Функционирование СППР. Это непосредственная информационная поддержка принятия решений оператором при возникновении конфликтных ситуаций в процессе функционирования системы. Информация о конфликтной ситуации поступает в базу данных СППР, производится распознавание ситуаций и занесение их индексов в базу данных. На основе этих индексов, а также временных характеристик и коэффициентов относительной важности ситуаций, которые хранятся в базе данных, формируется план разрешения ситуаций, который определяет относительную последовательность разрешения ситуаций с учетом их важности и срочности. После оценки оператор вводит индекс наиболее важной ситуации в базу данных. По индексу ситуации формируются гипотезы о возможных решениях. На основе индексов гипотез формируется план проверки гипотез.

Гипотезы о возможных решениях, план их проверки и справочная информация выдаются оператору в качестве рекомендаций по принятию решения. По индексу выбранной гипотезы формируется план реализации решения. Вводя команды управления, оператор ликвидирует конфликтную ситуацию.

Дообучение. Оно заключается в корректировке моделей в базе знаний на основе объективной информации подтверждения или опровержения гипотез о причинах конфликтных ситуаций.

Заключение

Применение на практике при создании ТСИ РКТ моделей оптимизации и поддержки принятия решений позволяет значительно улучшить качество создаваемых систем.

Предложенная СППР позволяет производить выбор алгоритма для решения задачи многокритериальной оптимизации при поддержке управляющих решений на всех этапах жизни ТСИ РКТ. Введение в состав классической модели подсистемы обучения позволяет значительно повысить качество решений и эффективность функционирования ТСИ РКТ.

Литература

1. Везенов В.И., Светников О.Г., Тимашев А.В., Иванов А.В. Опыт создания систем автоматизации испытаний систем измерений и электроиспытаний изделий ракетно-космической техники. – Радиотехнические тетради №33 2006 – 39 с.
2. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973.- 344 с.
3. Рыков А.С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация. – М.: "МИСИС", Изд. Дом "Руда и металлы", 2005. – 352 с.
4. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. – М.: "Наука", 1978. – 352 с.
5. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: "Наука", 1971 – 384 с.
6. Ларичев О.И. Теория принятия решений. –М.: Логос, 2000. – 296 с.

УДК. 681.518.3

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СБОРА, ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Новиков Ю.А., заместитель главного конструктора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», teandr@spectr.ryazan.ru

Тимашев А.В., заместитель главного конструктора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», teandr@spectr.ryazan.ru

Филаткин С.В., главный конструктор проекта, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4370@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: распределённые системы, сбор и обработка информации в реальном времени.

Введение

Испытания ракетно-космической техники на полигонах и космодромах является заключительным и наиболее дорогостоящим этапом её создания. Полигонные испытания должны решать следующие задачи:

- обеспечить подтверждение соответствия изделия заданным тактико-техническим и эксплуатационным характеристикам;

- обеспечить безаварийное и безопасное проведение работ, связанных с пусками изделий РКТ;

- обеспечить проведение испытаний в заданные сроки с минимизацией всех видов затрат (материальных, людских, экологических и т.д.);

- оценить эксплуатационные характеристики создаваемого изделия на соответствие возможностям эксплуатирующих подразделений.

Наиболее важной задачей, из вышеперечисленных, является задача обеспечения безаварийности и безопасности на всей трассе полета, в том числе и в случае аварийных ситуаций. Данная задача не может быть решена без обеспечения специалистов, ответственных за безопасность, информацией о поведении изделия в ходе эксперимента или запуска (далее по тексту - «репортаж») и проведения оперативной (предварительной) обработки измерений в центре обработки в реальном времени (РВ) хода эксперимента.

В существующих системах обеспечения пусков репортаж проводится на основе собранной и обработанной измерительной информации (ИИ). Заложенные при построении систем принципы существенно различаются и могут влиять на эффективность использования систем при проведении испытаний. Исходя из вышеперечисленного, актуальной является научно-техническая задача оценки эффективности распределенных систем сбора ИИ, применяемых для испытаний и пусков ракет – носителей различного назначения.

В одной из отечественных систем - системе «Сбор-Р» [4] реализован принцип сбора репортажных потоков ИИ в РВ для ведения репортажа и проведения оперативной (предварительной) обработки измерений. Применение данного решения было в значительной степени

Настоящая статья содержит краткое описание методики оценки эффективности принципиальных решений, лежащих в основе существующих и перспективных систем сбора и обработки измерительной информации реального времени. Анализ моделей систем выявляет заложенный в каждом варианте потенциал по обеспечению качества системы и позволяет выбрать тип системы на этапе её проектирования в зависимости от ограничивающих критериев применения системы.

обусловлено низкой пропускной способностью каналов связи.

В настоящее время появилась возможность надёжной передачи в РВ полных потоков ИИ. Развитие данного подхода обусловлено, в первую очередь, повышением пропускной способности каналов связи. Вместе с тем, повышение пропускной способности систем связи ограничено высокой стоимостью ресурсов таких каналов, что сохраняет актуальность применения принципов передачи репортажных потоков ИИ в РВ.

Целью настоящей статьи является аннотация методики оценки характеристик систем сбора и обработки ИИ в РВ на основе анализа их моделей, необходимого для выбора оптимальных архитектурных решений в определённых условиях использования систем.

Варианты построения систем обработки информации РВ

С учётом представленных выше тенденций предложены аналитические модели, назначением которых является формальное сравнение различных вариантов архитектурных решений систем сбора и оперативной обработки информации, выявление заложенного в каждом варианте потенциала по повышению качества системы информационно-измерительного обеспечения испытаний в целом:

- передача полных потоков данных в режиме РВ как с борта изделия, так и с измерительного пункта в центр для обработки и отображения;

- передача с борта изделия полных потоков ИИ, формирование на измерительном пункте в режиме РВ репортажных потоков и передача в центр для обработки и отображения;

- передача с борта изделия полных потоков ИИ, обработка данных для репортажа на измерительном пункте и передача в центр результатов обработки для отображения.

Представленные модели сведены в таблице 1.

Таблица 1.

№ пп	Наименование модели	Место обработки ТМИ		
		Изделие	Измерительный пункт	Центр обработки
А	«Вся обработка в центре»	-	-	+
Б	«Формирование репортажных потоков ТМИ на ИП, обработка в центре»	-	+	+
В	«Вся обработка на ИП»	-	+	-

По определению, приведённому в ГОСТ РВ 51987-2002 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Типовые требования и показатели качества функционирования информационных систем. Общие положения», под «информационной системой» понимается «АС, результатом функционирования которой является представление выходной информации для последующего использования». Рассматриваемые в статье системы обработки ИИ в РВ подпадают под данное определение. Поэтому при анализе вариантов архитектурных решений были использованы характеристики, с наборами соответствующих показателей, определённые вышеуказанным стандартом, в частности надёжность, своевременность и полнота представления информации.

Оценка эффективности вариантов построения систем

Аналитическая модель для оценки надёжности представления информации сформулирована следующим образом: при экспоненциальной аппроксимации распределений исходных характеристик и их независимости вероятность надёжного представления информации $P_{\text{над}}$ в течение заданного периода $T_{\text{зад}}$ вычисляют по формуле

$$P_{\text{над}} = \frac{T_{\text{нар}}^2}{(T_{\text{вос}} + T_{\text{нар}})(T_{\text{зад}} + T_{\text{нар}})},$$

где $T_{\text{нар}}$ – среднее время наработки на отказ технических средств, реализующих систему сбора ИИ;

$T_{\text{вос}}$ – среднее время восстановления технических средств системы после отказа;

$T_{\text{зад}}$ – задаваемый период надёжного функционирования.

Значения $T_{\text{нар}}$, $T_{\text{вос}}$ определяют в результате расчета, учитывающего характеристики надёжности технических средств.

Для общности учета влияния сбоев в сегменте радиосвязи, с учетом влияния ненадёжности технических средств, введем представление сбоя как самоустраниющегося отказа. Время восстановления («самовосстановления») принимаем равным времени передачи единичного элемента сигнала.

Требуемая своевременность обработки данных обеспечивается на основе выбора производительных средств обработки, технологий обработки запросов и рациональной настройки параметров. Процессы обработки данных в общем случае должны моделироваться как процессы массового обслуживания. Однако репортаж выполняется в РВ, процессы обработки регламентированы и должны, как правило, исключать флуктуацию времени обработки. Принимаем вместо вероятно-

стой оценку в виде заданной величины времени представления информации. В то же время, варианты архитектурных решений могут приводить к вариации времени представления информации α и ее составляющих: $\alpha = (\varpi + \delta + \beta)$, где ϖ – среднее время подготовки, δ – среднее время передачи и β – среднее время ввода в обработку и обработки, поэтому сама характеристика будет учитываться при оценке вариантов решений.

Под объектами учета (ОУ) предметной области будем понимать отдельные измерения параметров объекта испытаний. Технология доведения информации до центра обработки в рассматриваемых вариантах архитектурных решений различна (это передача всех измерений, части непосредственных измерений или передача данных в форме результатов обработки).

До момента пока новые ОУ, ранее неучтенные и появившиеся в динамике функционирования системы, не доведены до центра обработки, в системе формально отсутствует полнота оперативного отражения требуемых ОУ. Требуемая полнота обеспечивается на основе реализации в системе рациональных технологий сбора ИИ.

Для пуассоновского потока новых ОУ вероятность обеспечения полноты оперативного отражения вычисляют по формуле

$$P_{\text{полн}} = e^{-\lambda(\varpi + \delta + \beta)},$$

где: λ – частота появления новых ОУ в процессе функционирования системы;

В рассматриваемом случае уточнения требует характер потока новых ОУ. Поток данных телеизмерений в общем случае детерминированный и высокоинтенсивный. Без конкретных расчетов очевидно, что при $\alpha = 10$ с и реальной интенсивности измерений λ , вероятность $P_{\text{полн}}$ будет приближаться к нулевому значению. Формальный подход в данном случае должен быть изменен. В подобных моделях под потерей полноты будем понимать сообщения, отброшенные при обработке из-за искажений при передаче.

Исходными данными для параметров указанных выше моделей приняты:

в части технических средств системы:

$T_{\text{нар}} = 5173$ часов;

$T_{\text{вос}} = 1$ час;

$T_{\text{зад}} = 0,5$ часа (ориентировочное время сеанса репортажа);

в части сегмента передачи данных:

исходным условием для определения параметров модели приняты:

- сбой в сегменте передачи представляется отказом с самовосстановлением;

- вероятность ошибки на единичный элемент сигнала ($P_{ошC}$) – не более 10^{-6} в течение не менее 90% времени любого месяца;

- максимальная пропускная способность ($V_{макс}$) – 2048 кбит/с.

Для перехода к единообразному представлению сегмента передачи и вычислительных сегментов для сегмента передачи рассчитаны:

среднее время наработки на отказ $T_{нар} = 0,000135634$ часа.

$$\text{(исходя из } P_{надC} = 1 - P_{ошC} = e^{-\frac{t_{ec}}{T_{нар}}}, T_{нар} = \frac{\ln(1 - P_{ошC})}{t_{ec}} \text{)},$$

где время передачи единичного сигнала

$$t_{ec} = \frac{1}{V_{макс}} = 4,88281 \cdot 10^{-7} \text{ с} = \frac{1}{V_{макс} \cdot 3600} = 1,35634 \cdot 10^{-10} \text{ часа};$$

среднее время восстановления

$$T_{вос} = t_{ec} = \frac{1}{V_{макс} \cdot 3600} = 1,35634 \cdot 10^{-10} \text{ часа.}$$

(как указано выше принимается, что время самовосстановления равно времени передачи единичного элемента сигнала);

Задаваемый период надежного функционирования $T_{зад}$ определяется особенностью радиотракта: его воздействие на передаваемый сигнал существует только в

момент передачи, поэтому $T_{зад}$ для каждого исследуемого варианта определяется исходя из требуемого объема (M_n) передаваемых по радиотракту данных:

$$T_{зад} = \frac{M_n}{2} t_{ec}$$

(2 в знаменателе учитывает особенность кодирования данных в радиотракте, при которой единичный сигнал передает 2 бита данных). Оценка M_n составляет: 760 Мбайт (для полного потока за сеанс, интенсивность 4 Мбит/с); до 190 Мбайт (для репортажного потока за сеанс, интенсивность от 0,1 Мбит/с {для типа МБР(РН) с минимальным набором телеметрируемых параметров} до 1 Мбит/с { для типа МБР(РН) с максимальным набором телеметрируемых параметров}); до 2 Мбайт (для результатов обработки).

Задержка представления данных в центр обработки в режиме РВ – 10 с. Принимается $\alpha \leq 10$ с, а значения ее составляющих: время подготовки (ϖ), передачи (δ) и ввода в обработку и обработки (β) варьируется в вариантах реализации архитектурных решений и определены в моделях экспертным путем.

Результаты расчета показателей оцениваемых вариантов сведены в таблицу и представлены ниже (Таблица 1).

Диаграммы с графическим представлением результатов сравнения представлены соответственно на рисунке (Рис. 1).

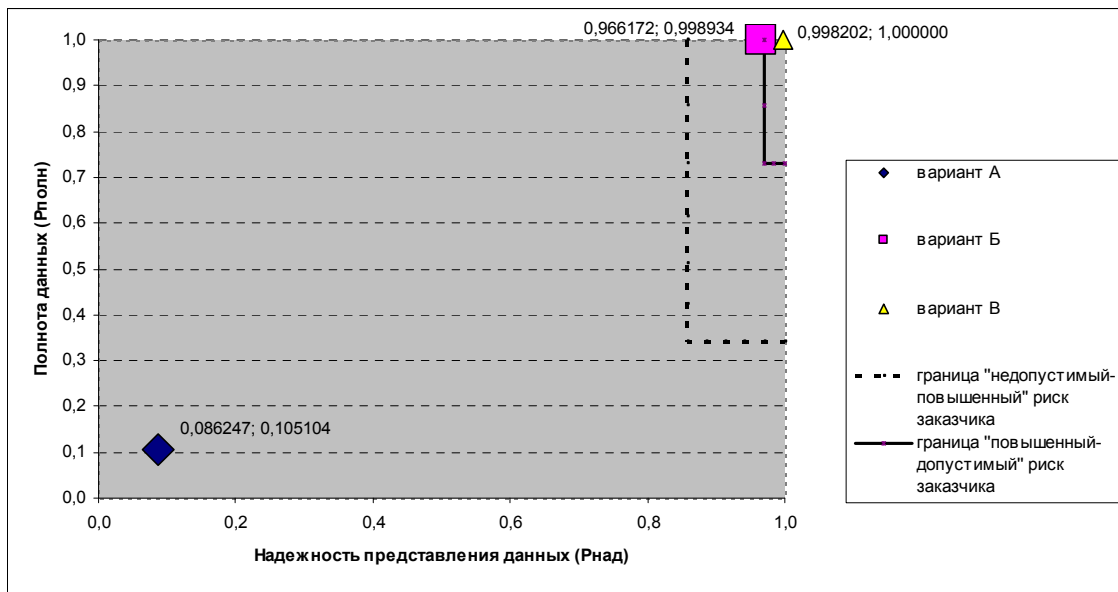


Рис. 1 Распределение вариантов решений в координатах $P_{над}$ и $P_{полн}$.

Таблица 1.

Результаты оценки вариантов реализации

вариант	А	Б	В
показатели			
Надежность представления информации			
Вычислительные сегменты (наработка на отказ), ч	5000		
Вычислительные сегменты (интенсивность отказов), 1/ч	0,000200		
Радиотракт (наработка на сбой), ч	0,000135634		
Радиотракт (интенсивность сбоев), 1/ч	7372,80		

Радиотракт (интенсивность однократных сбоев на 2 байта передаваемых данных), 1/ч	7372,78		
Радиотракт (интенсивность двух- и более краткратных сбоев на 2 байта передаваемых данных), 1/ч	0,02		
Оценки			
Вычислительные сегменты ($P_{над}^{BC}$)	0,9997		
Радиотракт ($P_{над}^{PT}$)	0,000641749	0,994579	0,9999999998
Система в целом ($P_{над}^{BC} \cdot P_{над}^{PT}$)	0,000641556	0,99428	0,99970
Время подготовки для передачи (ϖ), с	0,5	0,15	9
Время передачи (δ), с	0,5	0,15	0,05
Время ввода в обработку и обработки (β), с	9	9	0,15
Задержка представления информации в центр обработки (α), с	11,000983305	12,288559	12,1993999998
Полнота оперативного отражения ОУ $P_{полн}$	0,00116	0,99987	0,9999999997

Заключение

Из результатов анализа, представленных выше видно, что архитектурные решения с реализацией комплекса функций предобработки на измерительных пунктах позволяют, несмотря на недостаточную надежность радиотракта, получить удовлетворительные показатели надежности представления информации в центр обработки ($P_{над} = 0,994$; рекомендуемое стандартом значение – 0,99 /при допустимом риске заказчика/) и полноты используемой информации ($P_{полн} = 0,99987$ рекомендуемое стандартом значение – 0,9 /при допустимом риске заказчика/).

Литература

1. Меньшиков В.А. Полигонные испытания. Книга I. - М.: «КОСМО», 1997.
2. Олейник И.И., Суворов А.В., Пискунов А.А. Натурная отработка сложных технических комплексов. - М.: Наука, 1990.
3. ГОСТ РВ 51987-2002 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Типовые требования и показатели качества функционирования информационных систем. Общие положения» - М. 2002
4. Везенов В.И., Новиков Ю.А. Анализ методов оптимизации проектных решений при создании распределенных систем

сбора измерительной информации // 14-я международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 98-99.

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF SYSTEMS DESIGNED FOR GATHERING, TRANSFERRING AND PROCESSING THE REAL-TIME MEASUREMENT DATA

Y.A. Novikov, A.V. Timashev, S.V. Filatkin

Keywords: distributed systems, data gathering and processing in a real-time mode.

This article covers a brief description of methods for estimation of efficiency of principal decisions that are the basis for the existing and prospective systems designed for gathering and processing the real-time measurement data. An analysis of system models discovers the system quality provision opportunities for each variant. The analysis also allows people to choose a system type at the system design stage depending on restrictive criteria for system application.

УДК 621.398.1

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ПРЕДЕТЕКТОРНОГО ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНТРОЛЯ ТМИ СТАНДАРТА IRIG

Лукашов Н.А., инженер-программист 1 категории, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4370@spectr.ryazan.ru

Петров П.И., инженер-программист, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4370@spectr.ryazan.ru

Тихомиров С.А., начальник сектора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4370@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: ТМИ, обработка, анализ, контроль.

В существующей практике обработки ТМИ стандарта IRIG (стандарт ТМИ США) существует задача обработки преддетекторного телеметрического сигнала (ПТМС), то есть модулированного для передачи в эфир. В настоящее время для записи ТМИ IRIG используется аппаратура компании SYPRIS /Metrum-Datatype (Sypris Data System inc., США). Технология записи данных измерений компании SYPRIS позволяет проводить преддетекторную регистрацию и запись широкополосного телеметрического сигнала передаваемого на различных частотах. Ранее применяемая технология позволяла производить запись ТМИ стандарта IRIG только в постдетекторном виде (ТМИ IRIG) [9].

Отличительной особенностью ПТМС и ТМИ IRIG является различие форматов записи данных содержащих телеметрическую информацию и объема исходных данных для обработки ТМИ. Так ТМИ IRIG, либо демодулирована, либо в сопроводительных данных содержится полное описание для ее демодуляции. Формат записи ПТМС – преддетекторный радиотехнический сигнал модулированный несущей с частотой $1/(Ndx)$ и оцифрованный с частотой дискретизации $1/dx$ и, для которого отсутствуют данные по его обработке и способам получения телеметрической информации.

Для контроля ТМИ IRIG решаются следующие задачи:

- запись ТМИ в унифицированный цифровой формат на компьютерный носитель информации в виде группового телеметрического сигнала (ГТС);
- определение параметров ГТС (способ записи слов, скорость записи слов, применяемые методы модуляции и кодирования и пр.);
- формирование шкалы времени ГТС;
- демодуляция и декодирование ГТС;
- монтаж и анализ качества ГТС;
- обработка ГТС с целью выделения параметров контроля;
- анализ и контроль параметров;
- информационная поддержка анализа и обработки ТМИ IRIG.

В данной статье приведен способ организации вычислительного процесса при обработке и анализе преддетекторного телеметрического сигнала при проведении контроля ТМИ стандарта IRIG. Выдвинута задача определения параметров телеметрического сигнала. Проанализированы все известные методы демодуляции оцифрованного радиотехнического сигнала. Приведено описание метода квадратурного детектирования как универсального метода демодуляции сигнала.

Структурная схема вычислительного процесса контроля ТМИ IRIG приведена на рис. 1.

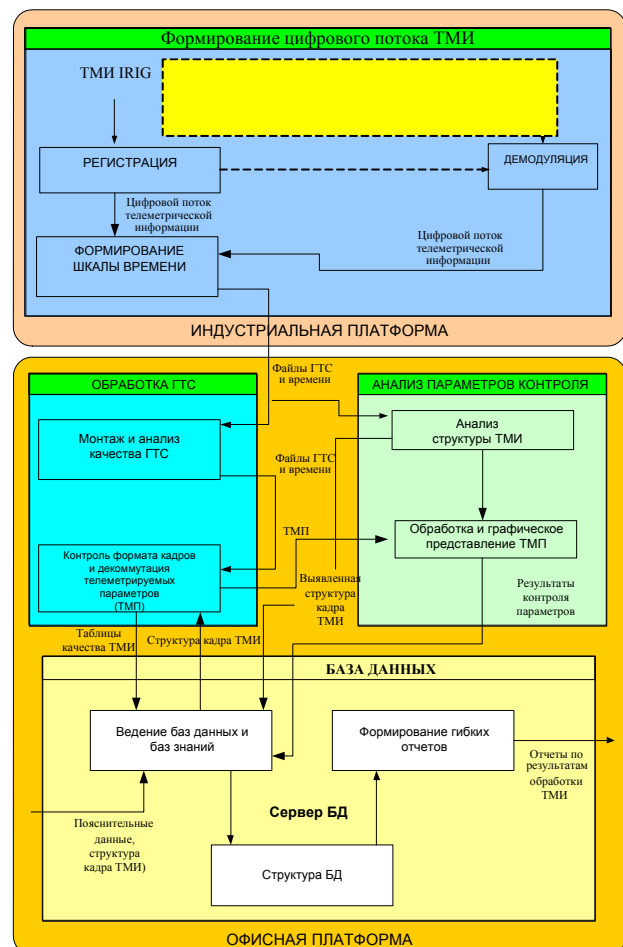


Рис. 1. Схема вычислительного процесса обработки и анализа ТМИ IRIG



В соответствии со схемой вычислительный процесс для контроля ТМИ можно разбить на три этапа:

- 1) формирование цифрового потока ТМИ (группового телеметрического потока или просто ГТС);
- 2) обработка ГТС;
- 3) анализ параметров контроля и формирование отчетов по результатам анализа.

Проведем анализ этапов контроля ТМИ IRIG.

На первом этапе производится первичная обработка информации, представленной на первичных носителях ТМИ, с целью получения циклической структуры ТМИ и временной шкалы [7,8]:

- 1) для ТМИ IRIG производится:

- определение параметров телеметрического сигнала (в соответствии с заданными исходными данными);
- регистрация информации методом оцифровки сигналов от специальных магнитных регистраторов Метрум (СМР) и запись ТМИ в унифицированный цифровой формат на компьютерный носитель информации виде группового телеметрического сигнала (ГТС);
- демодуляция в соответствии с исходными данными методом квадратурного детектирования;
- формирование шкалы времени методом регистрации меток времени записанной на магнитной ленте по отдельной дорожке;

- 2) для ПТМС в виде файлов на компьютерных носителях должны производиться:

- конвертирование файла в унифицированный цифровой формат на компьютерный носитель информации виде группового телеметрического сигнала (ГТС);
- определение параметров радиотехнического сигнала, содержащего ТМИ, методами спектрального, корреляционного (временного) и статистического анализа;
- демодуляция в соответствии с определенными параметрами методом квадратурного детектирования;
- формирование шкалы времени методом восстановления меток времени с привязкой к характерным событиям, по которым имеются точные временные измерения (начало регистрации ТМИ, окончание регистрации ТМИ, скорость записи цифровых слов);

На втором этапе производится обработка ГТС с целью выделения параметров контроля и получения таблиц качества ТМИ:

- оценка качества методом контроля параметров: счетчика, маркеров и констант;
- монтаж ГТС в автоматическом и ручном режимах методами обработки таблиц фрагментов качественной информации и выбором наиболее качественной информации из зарегистрированных участков;
- декоммутация параметров (по априорным данным для анализа или по выявленной структуре) методом битовой сборки ТМП из ГТС;
- контроль формата кадров методом корреляционного анализа и контроля параметра – счетчика, маркеров и констант;

На третьем этапе производится анализ телеметрируемых параметров с целью контроля и формирование отчетов по результатам анализа ТМИ:

- обработка ТМП известными математическими методами (интегрирование, дифференцирование, логарифмирование и пр.);

- анализ (выявление) структуры ТМИ методом статистического и корреляционного анализа структурных характеристик информации по накопленным данным в базе знаний результатов обработки [6];

- графическое представление методом отображения на битовые матрицы, графики зависимости по времени, гистограммы.

- формирование отчетов методом графического программирования форм представления и запроса к данным.

Как видно из анализа этапов обработки и анализа ТМИ, наиболее важным и ответственным с точки зрения обработки ПТМС является этап формирования цифрового потока ТМИ (ГТС). Остальные задачи второго и третьего этапов являются традиционными для обработки ТМИ IRIG. Так, задача «определение параметров телеметрического сигнала» для ТМИ IRIG выполняется путем ввода заданных исходных данных. Для определения параметров ПТМС необходим аппарат идентификации параметров телеметрического сигнала и демодуляции для получения ТМИ IRIG.

Решение задачи демодуляция ГТС

При реализации данной задачи проанализированы все известные методы демодуляции оцифрованного радиотехнического сигнала и сделан выбор метода квадратурного детектирования как универсального метода демодуляции.

Метод квадратурного детектирования основан на квадратурном представлении сигнала, которое заключается в выражении синусоидального колебания с произвольной фазой и амплитудой как линейной комбинации синусоидального и косинусоидального колебаний с нулевыми начальными фазами [2,5].

$$s(x) = A(x) \cos(\varepsilon + f(x)) = A(x) \cos(\varepsilon + \psi(x)) \cos(2\pi u_0 x) - A(x) \sin(\varepsilon + \psi(x)) \sin(2\pi u_0 x), \quad (1)$$

где $f(x)$ и $A(x)$ - отклонения фазы и амплитуды сигнала соответственно;

ε - начальная фаза и $\psi(x)$ - отклонение фазы,

$2\pi u_0 x$ - значение фазы опорного сигнала (несущей),

$A(x) \cos(\varepsilon + \psi(x))$ и $-A(x) \sin(\varepsilon + \psi(x))$ - квадратурные составляющие сигнала.

Соответственно, по этой методике входной сигнал для демодуляции можно представить в виде:

$$s(x) = s_0(x) + s_c(x) \cos(2\pi u_0 x) + s_s(x) \sin(2\pi u_0 x), \quad (2)$$

где:

$s_0(x)$ - помеха;

$$s_s(x) = s_m(x) \sin[\varepsilon + \psi(x)]; \quad (3)$$

$$s_c(x) = s_m(x) \cos[\varepsilon + \psi(x)]. \quad (4)$$

Квадратурные составляющие (3) и (4) содержат информацию об огибающей:

$$s_m(x) = a + A(x) = \sqrt{s_s^2(x) + s_c^2(x)}, \quad (5)$$

и о фазе:

$$\varphi(x) = \varepsilon + \psi(x) = \arctg \left[\frac{s_s(x)}{s_c(x)} \right], \quad (6)$$

В результате линейной обработки данных можно получить оптимальные оценки начальной фазы ε

(амплитуды a) и отклонений фазы $\varphi(x)$ (амплитуды $A(x)$). Составляющие (3) и (4) можно найти с использованием синхронного детектирования исходного сигнала (2) на частоте ω_0 при синусоидальном и косинусоидальном дискретных опорных сигналах, как это показано на рис. 2.

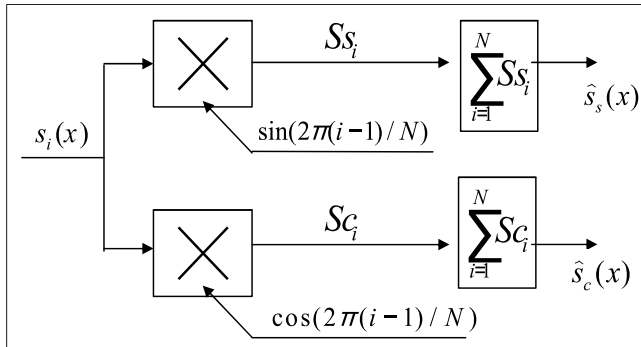


Рис. 2. Блок-схема дискретного синхронного квадратурного детектирования [3].

где $s_i(x)$ – последовательность данных входного сигнала за период несущей (Ndx),
 dx – период дискретизации сигнала.

При обработке опорные сигналы формируются в N дискретных точках на периоде изменения фазы 2π рад (на тактовом интервале). Тогда, в соответствии с (3, 4) и (6), значения фазы вычисляются по очевидной формуле:

$$\varphi(x) = \arctg \left[\frac{\sum_{i=1}^N s_i(x) \sin[2\pi(i-1)/N]}{\sum_{i=1}^N s_i(x) \cos[2\pi(i-1)/N]} \right] = \arctg \left[\frac{\hat{s}_s(x)}{\hat{s}_c(x)} \right], \quad (7)$$

В соответствии с (3, 4) и (5), значение амплитуды (огибающей) вычисляются по формуле:

$$s_m(x) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N s_i(x) \sin[2\pi(i-1)/N] \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N s_i(x) \cos[2\pi(i-1)/N] \right)^2}, \quad (8)$$

$$s_m(x) = \sqrt{(\hat{s}_s(x))^2 + (\hat{s}_c(x))^2}$$

Соответственно любой входной сигнал можно представить в виде ряда $(\hat{s}_s(x), \hat{s}_c(x))$. При этом принято интегральную характеристику синфазной и квадратурной составляющей на тактовом интервале Ndx обозначать согласно формулам:

$$\text{Im}(s) = \hat{s}_s(x) = \sum_{i=1}^N s_i(x) \sin[2\pi(i-1)/N], \quad (9)$$

$$\text{Re}(s) = \hat{s}_c(x) = \sum_{i=1}^N s_i(x) \cos[2\pi(i-1)/N]. \quad (10)$$

В соответствии с вышесказанным, значению демодулируемого символа $\text{SIM}_i(x)$ будет соответствовать пара значений $(\hat{s}_s(x)_i, \hat{s}_c(x)_i)$ из множества возможных символов для данного вида модуляции $\{\text{SIM}=(\hat{s}_s(x), \hat{s}_c(x))\}$

На основе теоретической модели вычислительный процесс демодуляции можно свести к выполнению следующих последовательных операций:

а) подготовка исходных данных: задание несущей

частоты, задание вида модуляции (параметров сигнального созвездия: параметры n^2 уровней $(\hat{s}_s, \hat{s}_c)$, для n -позиционной модуляции или n^2 волновых функций $(\hat{s}_s(x), \hat{s}_c(x))$, для модуляций с непрерывной фазой), задание величины символического интервала (или частоты следования бит).

б) чтение из памяти отсчетов сигнала и формирование опорных синусоидального и косинусоидального сигнала на промежуточной частоте;

с) формирование потоков синфазной и квадратурной составляющей из сигнала ПЧ;

д) оценка ближайшего из n^2 уровней (или волновых функций, для модуляций с непрерывной фазой) по методу наименьших квадратов, к которому принадлежит уровень каждой из составляющих символического интервала;

е) составление из полученных символов, информационной последовательности.

Процесс вычисления функционирует в бесконечном цикле б)-е) (до окончания приема сигнала).

Решение задачи определения параметров телеметрического сигнала

Другой, не менее важной, задачей обработки ПТМС является задача определения параметров телеметрического сигнала:

- несущей частоты,
- вида модуляции,
- величины символического интервала (или частоты следования бит)

Для определения несущей частоты необходимо:

1) провести спектральный анализ сигнала (формула 11) [4] на $M_{0,1}$ дискретных участках длительностью 0,1 с (точность временной привязки ТМИ IRIG для проведения последующей обработки с учетом погрешности регистрации сигнала от подвижного объекта).

$$X(n, M) = \sum_{k=0}^{N_g-1} S(MN_g + k) \exp \left[-j \frac{2\pi nk}{N_g} \right], \quad (11)$$

$$n = \overline{1(1)N_g}, M = \overline{1(1)M_{0,1}},$$

где $X(n, M)$ - коэффициенты ряда Фурье для M исследуемого участка сигнала $S(x)$;

N_g – количество исследуемых гармоник сигнала (отсчетов в промежутке длительностью 0,1 с).

2) вычислить максимальные коэффициенты ряда Фурье для каждого дискретного участка M и определить для него частоту по формулам:

$$F_{\text{несущей}}(M) = \frac{n_{\max(X(n, m))}}{N_g T}, \quad M = \overline{1(1)M_{0,1}}, \quad (12)$$

или

$$N(M) = \frac{N_g}{n_{\max(X(n, M))}}, \quad M = \overline{1(1)M_{0,1}}, \quad (13)$$

где T – период дискретизации сигнала, с;

$n_{\max(X(n, M))}$ - номер гармоники, для которой коэффициент ряда Фурье принимает максимальное значение,

$N(M)$ – количество отчетов формируемых с частотой дискретизации $1/T$ за период несущей частоты на участке M сигнала $S(x)$.

Для определения остальных параметров необходимо провести квадратурное детектирование с использованием *mod* количества методик демодуляций известных сигналов. Критерием правильности подбора (выбора) метода демодуляции является получение *I* участков на которых автокорреляционная функция от полученной последовательности информационных символов $SIM(x)$

постоянна. При этом минимальное значение длительности таких участков должно быть наибольшим (по сравнению с другими методами) и, по крайней мере, в три раза больше значения $1/F_{несущей}(M)$ (минимальное требование помехоустойчивости сигнала).

Блок-схема определения параметров демодуляции приведена на рис. 3.

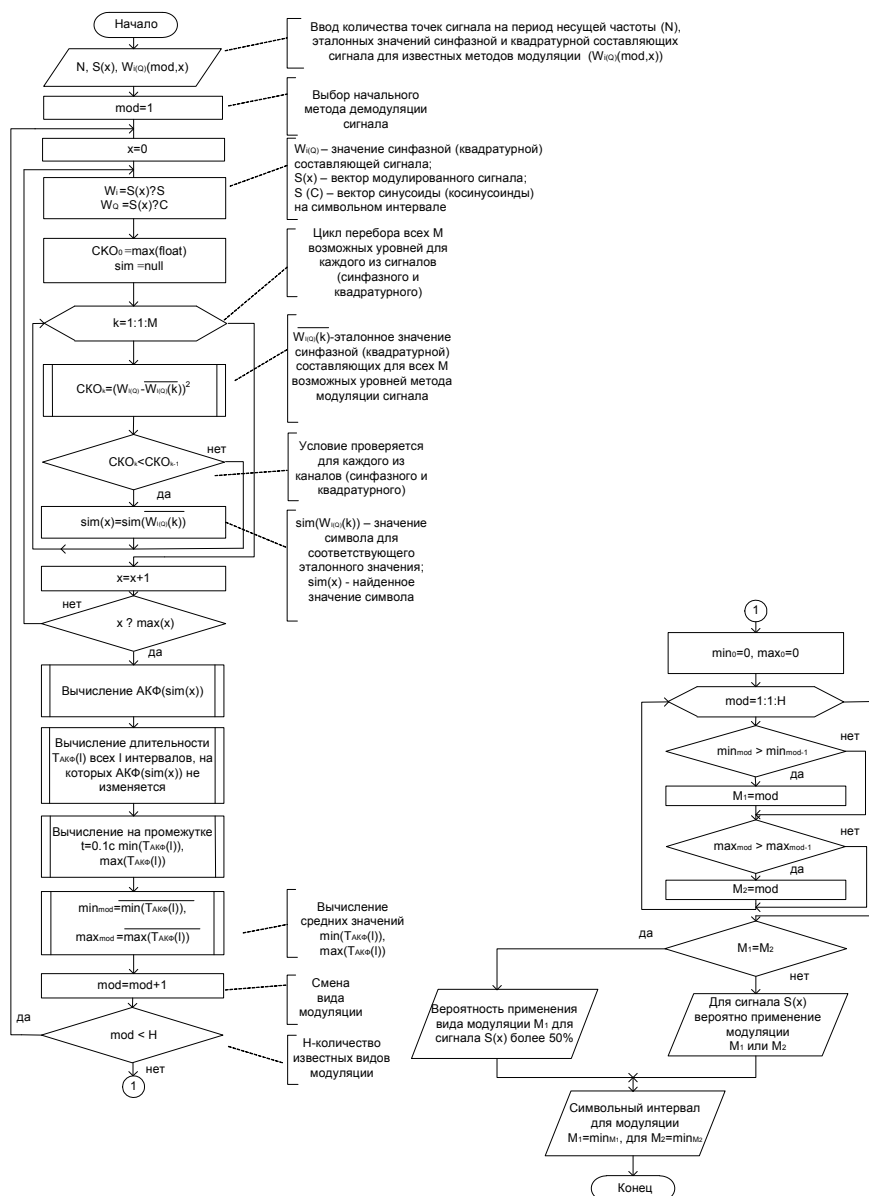


Рис. 3. Блок-схема определения основных параметров демодуляции сигнала.

Заключение

Приведенный способ обработки преддетекторных телеметрических сигналов позволяет проводить сквозную обработку и анализ ТМИ стандарта IRIG без наличия каких либо априорных исходных данных о параметрах сигнала и структуре ТМИ.

Литература

1. Прокис Дж. Цифровая связь, М, Радио и связь, 2000, 797 с.
2. Рихтер С.Г.. Цифровое радиовещание. М. «Горячая линия - Телеком», 2004. с. 89
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Издание второе., М., Вильямс,

2003, с196-231,

4. Сергиенко А.Б.. Цифровая обработка сигналов. Издание второе, М., Питер, 2006, с 296-297;
5. Кукушкин С.С., Потапов М.В. Оценивание структурных характеристик циклической информации. /Проектирование ЭВМ. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань, 1994. 112 с.
6. Standart IRIG 106-86. 1991 (<http://www.spiraltechinc.com/otis/download.html>).
7. Standart IRIG 106-00. 2000 (<http://www.spiraltechinc.com/otis/download.html>).
8. Сайт компании «Sypris Data Systems Inc» (<http://www.sypris.com>).

УДК 629.7

МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СЕГМЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Тишкин Р.В., начальник отдела, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр»,
4374@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, искусственные нейронные сети, нечеткая логика, сегментация изображений.

Введение

В настоящее время значительно увеличился поток информации, получаемой от космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Растет и число потребителей. Если раньше работать с высокодетальной информацией могли себе позволить лишь ряд организаций, то в настоящее время практически любой человек способен получить такую информацию. В связи с этим возрастает и номенклатура задач, решаемых с использованием данных ДЗЗ. При этом возникает необходимость в автоматизации не только предварительной обработки данных ДЗЗ (до уровня 4), но и обработки тематической, т.е. обработки, нацеленной на конечного потребителя. Здесь ведущую роль начинает играть сегментация изображений, которая представляется собой первый шаг к переходу от количественного представления изображения к качественному. На сегодняшний день, в большинстве случаев, тематическая обработка изображений производится в ручном либо интерактивном режиме. Для того чтобы добиться автоматического режима нужно использовать другие средства, например мягкие вычисления.

Термин «Мягкие вычисления» (Soft computing) впервые ввел Л. Заде в своей работе [1]. На сегодняшний день под мягкими вычислениями понимается совокупность методов, использующихся для решения задач с высокой степенью неопределенности. Это искусственные нейронные сети (ИНС), нечеткая логика (НЛ) и эволюционные вычисления, в различных комбинациях.

Рассмотрим возможности данных методов на примере сегментации космических изображений.

Искусственные нейронные сети

Искусственные нейронные сети (ИНС) для обработки изображений и распознавания образов используются достаточно длительное время и многими исследователями [2, 3]. Данное обстоятельство обусловлено особыми и важными свойствами ИНС, в первую очередь положительными качествами в распознавании образов [2, 6].

Применение ИНС непосредственно в задачах обработки аэрокосмических изображений достаточно подробно приведено в [4, 5]. Предложено использовать модель многослойного персептрона в сочетании с алгоритмом обратного распространения ошибки, предназначенным для обучения (с учителем) ИНС. Подобный под-

В статье рассматривается вопрос о применении методов и алгоритмов относящихся к «мягким вычислениям» (искусственные нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы) в задаче автоматической сегментации космических изображений Земли.

ход положительно зарекомендовал себя при решении разного рода задач искусственного интеллекта в нашей стране и за рубежом. Однако для решения задачи автоматической сегментации изображений он подходит слабо, т.к. требует участия оператора. Существуют и другие типы ИНС, в работе которых участие оператора не требуется.

В качестве примера рассмотрим задачу сегментации облачности на космических изображениях с использованием помощи ИНС «модель Кохонена» [2].

Вектором $\vec{f} = [f_R, f_G, f_B]$ обозначим многозональное спутниковое изображение, где $f_Z = f_Z(x, y)$; $x = \overline{1, N_x}$; $y = \overline{1, N_y}$; $Z \in \{R, G, B\}$. ИНС задается матрицей $W = w(i, j)$ коэффициентов сети, в которой w_j - некоторый j -й столбец матрицы весовых коэффициентов.

На вход ИНС подается вектор $\vec{X} = (X_R, X_G, X_B)$ - входной вектор признаков, описывающий область изображения $\vec{r} \times \vec{r}$, где $f_Z = f_Z(x+s, y+t)$; $s = \overline{1, r}$; $t = \overline{1, r}$; $x = \overline{1, (r)N_x}$; $y = \overline{1, (r)N_y}$; $Z \in \{R, G, B\}$.

При введенных обозначениях алгоритм обучения ИНС может быть представлен в виде последовательности следующих шагов.

1. На обрабатываемом изображении случайным образом выделяется область размером $\vec{r} \times \vec{r}$ и формируется вектор $\vec{X}$. Этот шаг выполняется многократно, что позволяет сформировать обучающую выборку (без привлечения оператора).

2. Для каждого вектора $\vec{X}$ из обучающей выборки определяется функция

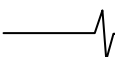
$$i(x) = \arg \min_j \| \vec{X} - w_j \|,$$

где $j = \overline{1, q}$; q - число нейронов сети в выходном слое.

1. Для нейрона, вектор весов которого наиболее близок к входному вектору, корректируются весовые коэффициенты по формуле: $w_j(l+1) = w_j(l) + \eta(l)(\vec{X} - w_j(l))$, где $\eta(l)$ - параметр скорости обучения; $w_j(l)$ - вектор синаптических весов j -го нейрона сети на шаге обучения l .

2. Обработка, реализуемая шагами 2 и 3, повторяется заданное число раз.

Параметр $\eta(l)$ позволяет варьировать скорость изменения весовых коэффициентов нейронной сети и в процессе обучения может изменяться по некоторому закону [6].



Процесс работы обученной ИНС “модель Кохонена” описывается следующей последовательностью шагов.

1. На обрабатываемом изображении последовательно выделяется область размером $r \times r$ и формируется вектор $\vec{X}$.

2. Для каждого вектора $\vec{X}$ определяется функция $i(x) = \arg \min_j \|\vec{X} - w_j\|$,

где $j = \overline{1, q}$; q - число нейронов сети в выходном слое.

3. На основании результатов анализа определяется нейрон “победитель”, т.е. исследуемая область относится к одному из классов (число определяемых классов, сегментов равно числу нейронов выходного слоя ИНС).

4. Пункты 1-3 повторяются последовательно для всех фрагментов $r \times r$, на которые разбивается обрабатываемое изображение.

С помощью данного алгоритма может быть решена задача локализации облачности на космических многозональных изображениях. Результаты работы алгоритма представлены на рис. 1. Приведенные примеры свидетельствуют о том, что алгоритм сегментации позволяет определять как плотную, так и легкую облачность.

Однако сравнительный анализ полученных результатов обработки спутниковых снимков показал ряд недостатков, которые наблюдаются у ИНС в случае применения её для решения рассматриваемой задач. К недостаткам рассмотренного алгоритма можно отнести следующее:

- метод обучения является чисто эвристическим, и завершение процедуры обучения не основывается на строгих оптимизационных математических моделях;
- обучение реализуется на основе случайного выбора, поэтому итоговые весовые коэффициенты выходных нейронов зависят от входной последовательности;
- различные начальные условия, как правило, приводят к различным результатам обработки.

В таблице 1 приведены результаты расчета ошибок ложного обнаружения и ложного пропуска, величины которых обеспечивает предложенный алгоритм. Отметим, что расчет ошибок может быть выполнен вручную оператором путем отнесения того или иного выделенного участка к некоторому классу и сравнения полученных результатов с результатами автоматической обработки. Совершенно очевидно, что полученные результаты сильно зависят от случайно набранной обучающей выборки.

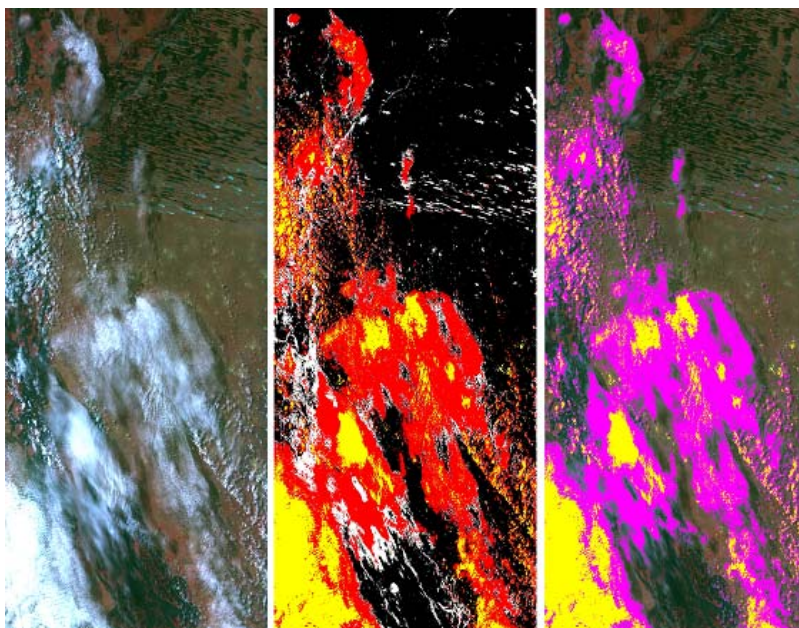


Рис. 1.

Таблица 1.

Оценка доли ложных обнаружений и ложных пропусков

Ложные обнаружения и пропуски	Алгоритм сегментации изображений на основе ИНС “модель Кохонена”				
	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4	Пример 5
обнаружение	0,0328	0,096152	0,000955	0,031198	0,016091
пропуск	0,037897	0,027064	0,037756	0,042287	0,037647
	Пример 6	Пример 7	Пример 8	Пример 9	Пример 10
обнаружение	0,17092	0,21026	0,19331	0,09027	0,17265
пропуск	0,005958	0,0039645	0,005845	0,031599	0,0020351
	Пример 11	Пример 12	Пример 13	Пример 14	Пример 15
обнаружение	0,1411	0,18016	0,22046	0,055055	0,19998
пропуск	0,0082896	0,0003105	0,026456	0,034144	0,0006707
	Пример 16	Пример 17	Пример 18	Пример 19	Пример 20
обнаружение	0,04038	0,040127	0,082472	0,051243	0,12407
пропуск	0,02234	0,077534	0,013937	0,037225	0,017542

Улучшением данного алгоритма является модификация процедуры генерации обучающей выборки, которая заключается в следующем. Предварительно изображение обрабатывается с помощью колориметрического алгоритма [7] с целью получения "грубой" карты облачности.

После чего на сегментируемом изображении, с учетом грубой карты облачности, выделяются фрагменты для обучающей выборки. Это происходит с таким расчетом, чтобы в равных пропорциях в обучающую выборку попали области соответствующие облачности, несоответствующие облачности и находящиеся на границе.

Использование такого подхода позволяет значительно стабилизировать результаты работы ИНС Кохонена. Однако необходимость в предварительной обработке изображения отрицательно сказывается на быстрейшем алгоритме в целом. Кроме того, из-за использования предварительной маски облачности алгоритм практически теряет возможность идентификации легкой облачности [5].

В целом для решения задач сегментации космических изображений наиболее подходящей оказалась ИНС многослойный персептрон с обучением по алгоритму обратного распространения ошибки. При использовании такой ИНС полностью исключить работу оператора невозможно. ИНС на основе самоорганизации нуждаются в дополнительных алгоритмах и процедурах пред- и постобработки данных, иначе результаты носят стохастический характер. Исходя из этого, можно говорить о том, что в «чистом» виде для создания системы автоматической сегментации космических изображений ИНС не пригодны. ИНС могут быть составной частью комплексной системы сегментации космических изображений Земли.

Нечеткая логика

Методы и алгоритмы нечеткой логики [1] стали использоваться в обработке изображений сравнительно недавно. Практически все предлагаемые методы сегментации изображений основаны на алгоритме нечетких k -средних (Fuzzy C Means, FCM) или его модифицированных версиях. Алгоритм FCM, в свою очередь, основан на алгоритме k -средних. Оба алгоритма достаточно подробно описаны в литературе [8, 9].

Исходными данными алгоритма FCM служат: X – матрица наблюдений обрабатываемого изображения ($X = [x_{ij}]$; $i = 1, N$; $j = 1, p$); k – количество кластеров; m – экспоненциальный вес; ε – параметр останова алгоритма.

Наиболее важным параметром алгоритма FCM является количество кластеров (k). Выбор количества кластеров, как правило, осуществляется для различных задач по результатам анализа априорной информации. Существуют методы автоматического выбора оптимального числа кластеров, большинство из них основаны на различных критериях оценки компактности кластеров, среди которых можно выделить индекс Хие–Бени [10] как наиболее оптимальный.

Другим параметром алгоритма FCM является экспоненциальный вес (m). При больших m конечная матрица нечеткого разбиения F_H "размывается". При

$m \rightarrow \infty$ она принимает вид $F_H = [1/k]$ (что является плохим решением, т.к. все объекты принадлежат всем кластерам с одной и той же степенью). На сегодня теоретически обоснованного решения по правилам выбора m не существует. Практически значение экспоненциального веса устанавливается в пределах [2:5].

В «чистом» виде алгоритмы сегментации изображений, основанные на FCM, обнаруживает несколько недостатков:

- решение может сводиться к нахождению локального оптимума, поэтому получаемые результаты могут зависеть от начальных параметров алгоритма;
- приемлемое решение находится в результате многократного прогона итеративных вычислений, что в значительной степени усложняет процесс обработки в реальном или квазиреальном масштабе времени.

Можно предположить, что использование нечетких множеств 2-го типа, позволит решить хотя бы часть проблем.

Нечеткие множества второго типа

Одной из последних тенденций в развитии нечеткой логики стало применение в системах искусственного интеллекта и принятия "мягких" решений нечетких множеств второго типа (type 2 fuzzy set, T2FS). По мнению некоторых зарубежных и отечественных специалистов использование методов обработки на основе T2FS может привести к заметному улучшению получаемых решений. Впервые идея нечетких множеств второго типа предложена Заде [1] и получила развитие в работах Менделя [11].

Понятие нечеткого множества 2-го типа в алгоритме нечеткой кластеризации элементов изображения следует использовать следующим образом. Экспоненциальный вес m определяется не точечным значением, а некоторым "нечетким" значением из интервала (m_1, m_2) , т.е. $m \in (m_1, m_2)$.

Обоснованность такого подхода рассмотрена в [5].

T2FS A представляется в форме нечеткой системы

$$A = \{((x, u), \mu_A(x, u)) | \forall x \in A,$$

$$\forall u \in J_x \subseteq [0, 1], \mu_A(x, u) = 1\},$$

в которой первичная функция принадлежности J_{x_i} образца x_i представляется интервальной функцией принадлежности со всеми вторичными степенями первичных функций принадлежности, равными 1.

Для задания интервальной первичной функции принадлежности определим нижнюю и верхнюю интервальные функции принадлежности при значениях фазификатора m_1, m_2 . Первичные функции принадлежности, представляющие образец x_i , определяются следующим образом:

$$\mu_j^{(B)}(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_1-1}}}, & \text{если } \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_1-1}}} > \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_2-1}}} \\ \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_2-1}}}, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_j^{(H)}(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_1-1}}}, & \text{если } \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_1-1}}} \leq \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_2-1}}}; \\ \frac{1}{\sum_{l=1}^k \left(\frac{D_{ji}}{D_{li}}\right)^{\frac{2}{m_2-1}}}, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2)$$

В (1) и (2) фаззификаторы m_1 и m_2 представляют различные нечеткие степени принадлежности, использование некоторых приводит к различным целевым функциям, которые должны быть минимизированы с помощью алгоритма FCM.

В результате выполнения алгоритма для каждого кластера сегментируемого изображения определяются два значения центра кластера $V_j^{(H)}$ и $V_j^{(B)}$ (в пространстве признаков сегментируемого изображения), поэтому в модернизированный алгоритм FCM предлагается ввести следующую процедуру расчета центров кластеров:

$$V_j = \frac{V_j^{(H)} + V_j^{(B)}}{2}. \quad (3)$$

Модернизацию центров кластеров следует выполнять в ходе реализации алгоритма FCM. Для этого используются операции “понижения типа” с помощью обобщенного центроида, применение которых подобно методу центра тяжести в базовом алгоритме кластеризации. Понижение типа во время поиска центров кластеров реализуется с помощью итерационного алгоритма Карника-Менделя [12]. Основным недостатком данного подхода приходится признавать резкое увеличение сложности вычислений и, как следствие, возрастание времени обработки, что особенно критично при обработке мультиспектральных спутниковых снимков. Предлагается следующая модификация алгоритма FCM: определяются два значения центров каждого кластера $V_j^{(H)}$ и $V_j^{(B)}$, $j = \overline{1, k}$. Полученные значения участвуют в модернизации центров кластера в соответствии с формулой (3). Подобная процедура модернизации центров кластеров будет более “грубой” по сравнению с предлагаемым в [12] использованием итерационного алгоритма Карника-Менделя. Алгоритм Карник-Менделя обеспечивает последовательную модернизацию центров кластеров, однако в основном (итерационном) цикле алгоритма FCM необходима реализация еще одного итерационного алгоритма. Подобное обстоятельство резко увеличивает время обработки. Предлагаемая модернизация алгоритма позволяет заметно улучшить результаты обработки по сравнению с базовым алгоритмом FCM (уступая по эффективности алгоритму из [12]), сохраняя сопоставляемую сложность вычислений.

Качественный анализ результатов обработки изображения показывает, что с увеличением разницы между значениями фаззификаторов m_1 и m_2 результаты обработки сглаживаются.

Гибридные системы сегментации изображений

Естественным следует признать применение в алгоритмах одного из методов эвристической оптимизации, например генетического алгоритма, моделирующего процессы природной эволюции и относящегося к эво-

люционным методам поиска [5, 13].

В общем случае генетическим алгоритмом называется следующий объект:

$$GA(P^0, r, l, sl, Fit, cr, mu, ot), \quad (4)$$

где GA – генетический алгоритм; P^0 – исходная популяция; r – количество элементов популяции; l – длина битовой строки, кодирующей решение; sl – оператор селекции; Fit – фитнес-функция (функция приспособленности), определяющая “пригодность” решения; cr – оператор кроссинговера (“скрещивания”) определяющий возможность нового решения; mu – оператор мутации; ot – оператор отбора.

Эффективный генетический алгоритм может быть построен только в том случае, если параметры и операторы в (4) будут выбраны на основе качественного анализа предметной области.

При решении задачи сегментации космических изображений структура хромосомы может быть представлена битовой строкой, в которой закодированы координаты центров кластеров. На рис. 2 приведен пример структуры хромосомы.

Cluster 1			Cluster 2			...			Cluster k		
R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B

Рис. 2.

Размер популяции выбирается из следующих соображений. При использовании $r > 20$ резко возрастает время работы алгоритма и требования к размеру оперативной памяти. Если $r < 20$, возникают случаи нестабильной работы генетического алгоритма, т.е. решение может быть неустойчивым.

В разработанном алгоритме применяется схема, так называемого классического ГА, в котором предполагается использовать строки постоянной длины (в мобильном ГА строки имеют переменную длину, т.е. могут быть переопределены и не доопределены). Применение оператора мутации mu в процессе реализации генетического алгоритма предназначено для выхода из локальных экстремумов. Практика применения генетических алгоритмов для решения задачи оптимизации рекомендует использовать классические процедуры генной мутации: изменение величины случайно выбранного гена. Мутации подвергается, как правило, до 5% особей популяции. В предлагаемом алгоритме реализуется стохастическое изменение нескольких бит хромосомы. Мутация выполняется с вероятностью 0,01..0,05 для каждой хромосомы и предполагает изменение от 1 до 5 случайно выбранных бит на их противоположенное значение.

Выбор оператора селекции sl родительской пары определяет качество поколений потомков. Наиболее часто в генетических алгоритмах используются следующие виды sl – операторов:

- случайный выбор пар;
- выбор пар на основе определения фитнес-функции Fit .

В алгоритме используется второй подход. В качестве фитнес-функции, при решении задачи сегментации, предлагается использовать индекс Хие-Бени [14]. Индекс Хие-Бени представляет из себя функцию следующего вида:

$$HB = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^2 \|V_i - X_j\|^2}{N \cdot \min_{i,j} \|V_i - V_j\|^2}, \quad (5)$$

где k – число кластеров; N – число объектов; μ_{ij} – функция принадлежности; V_i – координаты центра i -го кластера; X_j – некоторый j -й объект.

С помощью индекса Хие-Бени можно оценивать качество нечеткой кластеризации: чем меньше значение HB , тем разбиение элементов на классы выполнено качественнее. Та хромосома, которая обеспечивает наименьшее значение функции (5), признается более приспособленной, чем другие сравнимые варианты.

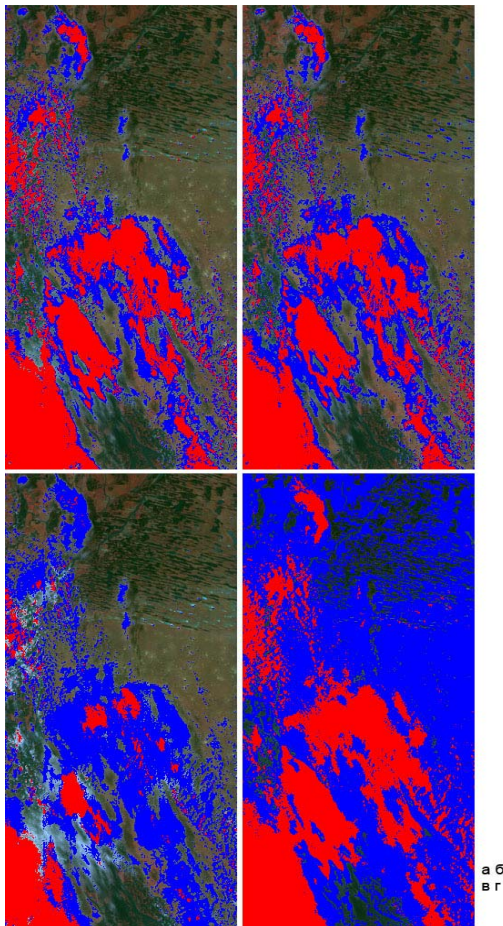


Рис. 3.

На рис. 3 приведены примеры идентификации облачности с помощью генетического алгоритма. Получены результаты обработки при 10 (г), 20 (в), 50 (б) и 100 (а) сменах поколений хромосом. Из приведенных рисунков видно, что при числе популяций 100 достаточно точно и надежно удается выявить образования типа “облачность” (красный цвет) и “полуоблачность” (синий цвет). Попытка увеличения числа популяций до 200 и выше не обеспечивает значительных преимуществ, но при этом резко увеличивается время работы алгоритмов и задействованный объем оперативной информации,

т.к. для каждой хромосомы требуется генерировать свою матрицу функций нечеткой принадлежности.

В целом анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что применение генетического алгоритма, обеспечивает нахождение субоптимального решения, но не приводит к какому-либо выигрышу по критерию быстродействия.

Заключение

Алгоритм FCM показывает достаточно хорошие характеристики по точности, однако с учетом указанных недостатков, не может считаться основным алгоритмом при решении задачи сегментации космических изображений. Использование генетических алгоритмов позволяет обеспечить снижение ошибки ложного обнаружения, но повышает ошибку ложного пропуска. Алгоритм, основанный на T2FS, обеспечивает наиболее сбалансированные показатели по соотношению ошибок ложного обнаружения и ложного пропуска. Следует отметить, что одна из основных проблем заключается в скорости обработки. Если не использовать современные подходы к увеличению скорости обработки, то реальное использование предложенных алгоритмов в задачах автоматической сегментации изображений будет затруднено.

Литература

1. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений – М.: Мир, 1976.-165 с.
2. Оссовский С. “Нейронные сети для обработки информации” М.: Финансы и статистика 2004.
3. Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений. Под ред. Ю.В. Гуляева и А.И. Галушкина. М.: Радиотехника 2003.
4. Atkinson P.M., Tatnall A.R.L. Neural Networks in Remote Sensing, Int. J. of Remote Sensing. 1997, vol. 18, no 4, pp. 699-709
5. А.Н. Пылькин, Р.В. Тишкин Методы и алгоритмы сегментации изображений. М.: Горячая линия- Телеком, 2010 – 92с.
6. Хайкин С., “Нейронные сети”, Полный курс, второе издание, Изд. дом “Вильямс”, 1104 стр.
7. Кузнецов А.Е., Кочергин А.М. Обработка изображений в задаче каталогизации данных дистанционного зондирования. Известия вузов: Геодезия и аэрофотосъемка. 2002г. №1. с. 166-172.
8. Штовба С.Д. Введение в теорию нечётких множеств и нечёткую логику. <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/>
9. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход, М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004г.
10. Xei X.L., Beni G.A. Validity Measure for Fuzzy Clustering // IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell. 3 (8). - 1991. - P. 841 - 846.
11. Mendel, J.M., Type-2 Fuzzy Sets and Systems and Overview // IEEE Computational Intelligence Magazine 2(1):20-29, February 2007.
12. Mendel Uncertain Rule-Based fuzzy logic systems: introduction and new direction, Prentice Hall, upper saddle river, NJ, 2001
13. Комарцова Л.Г., Максимов А.А. Нейрокомпьютеры, М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 400с.
14. Xei X.L., Beni G.A. Validity Measure for Fuzzy Clustering // IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell. 3 (8). - 1991. - P. 841 - 846.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОРРЕКЦИИ СТРУКТУРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Еремеев В.В., зам. главного конструктора филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», директор НИИ «Фотон» РГРТУ, д.т.н., e-mail: foton@rsreu.ru

Зенин В.А., аспирант РГРТУ, НИИ «Фотон», м.н.с., e-mail: foton@rsreu.ru

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиометрическая коррекция, неоднородный сюжет, функция распределения, автоковариационная функция, времязависимые искажения.

Введение

Сканирующие устройства, построенные на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), широко используются в практике дистанционного зондирования Земли. ПЗС обладают высокими техническими характеристиками, но им присущ и серьезный недостаток: фотоприемные элементы отличаются друг от друга чувствительностью и уровнем темнового сигнала. В результате на изображении появляются искажения в виде характерной «полосатости». В видеодатчике, состоящем из нескольких ПЗС-линеек, наблюдаются яркостные различия между сканами – наборами видеоданных, сформированными различными ПЗС-линейками (рис. 1).

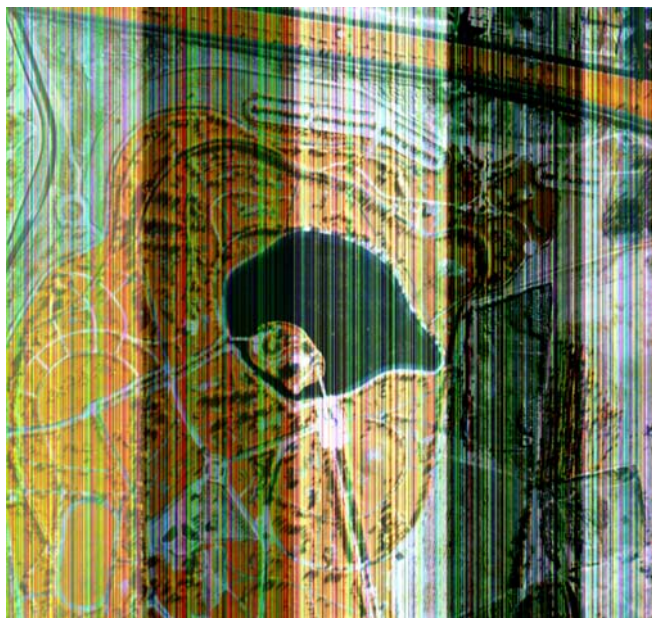


Рис. 1. Фрагмент изображения от многоматричного видеодатчика

В одноэлементных сканирующих устройствах также могут наблюдаться структурные искажения, вызванные изменением чувствительности фотоприемника в процессе формирования изображения и неидеальностью системы развертки сканера (рис. 2).

Рассмотрена задача коррекции на космических снимках земной поверхности структурных искажений, обусловленных изменением во времени передаточных характеристик фотоприемных элементов видеодатчика. Представлены общее решение этой задачи, а также подходы, ориентированные на коррекцию изображений, содержащих существенно неоднородные по яркости объекты. Рассмотрены вопросы коррекции видеоданных от многоматричных сканирующих устройств, в том числе подходы по компенсации времязависимых структурных искажений. Приведены результаты обработки реальных снимков.

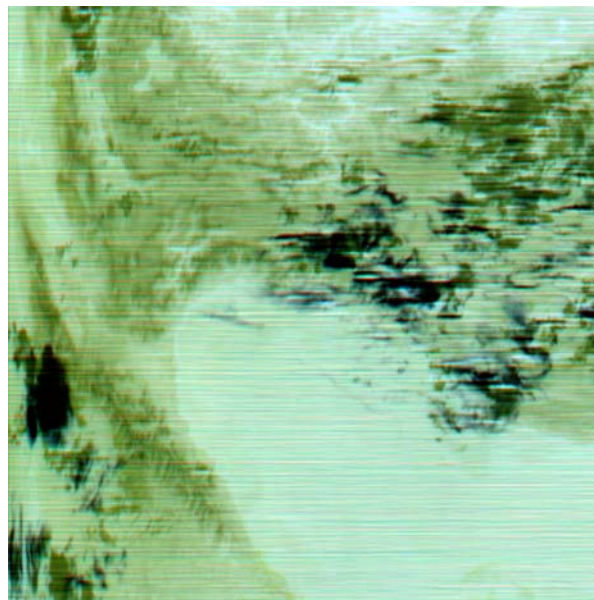


Рис. 2. Времязависимые структурные искажения

Существует две базовые технологии коррекции структурных помех [1,2]: по данным бортовой калибровки датчика и на основе статистического анализа искаженного изображения. Высокое качество коррекции по данным калибровки может быть достигнуто только при высокостабильных калибровочных сигналах и их неизменности по всему полю зрения датчика, что на практике трудно реализуемо. Для коррекции времязависимых искажений в силу их случайного характера калибровочные данные сформировать в принципе невозможно. Статистические подходы не требуют калибровочной информации, поэтому в последнее время они активно исследуются и внедряются.

Статистический подход к коррекции структурных искажений в общем случае основан на сопоставлении эмпирической функции распределения яркости m -го корректируемого столбца изображения $F_m(b)$,

$m=1, \overline{M}$, с некоторой эталонной функцией $F_{m\varphi}(b^*)$, которая обычно формируется по симметричной апертуре столбцов: $F_m(b) = F_{m\varphi}(b^*)$ [2], где b и b^* - значения яркости до и после коррекции. Корректирующая функция $\varphi_m(b)$ определяется

$$b^* = \varphi_m(b) = F_{m\varphi}^{-1}(F_m(b)), \quad m = \overline{1, M}. \quad (1)$$

Базовая линейная модель коррекции

Установлено, что для ПЗС функция $\varphi_m(b)$ в (1) линейна: $b^* = g_m b + a_m$. Мультипликативный коэффициент g_m характеризует чувствительность фотоприемника, а аддитивный a_m - темновой сигнал. Находя средние яркости $\overline{b_m^*} = g_m \overline{b_m} + a_m$ и отсчеты автоковариационной функции (АКФ) $\mu_m^* = g_m^2 \mu_m$ по всем элементам столбца и апертуры, определяются искомые коэффициенты функций коррекции структурного шума:

$$g_m = \sqrt{\mu_m^* / \mu_m}, \quad a_m = \overline{b_m^*} - \overline{b_m} g_m, \quad m = \overline{1, M}. \quad (2)$$

Такая модель дает хорошие результаты, она не критична к влиянию аддитивного некоррелированного шума, который на практике почти всегда присутствует на изображении. Однако линейная модель не обеспечивает высокого качества коррекции, когда изображение содержит объекты, значительно отличающиеся по яркости [3].

В то же время линейная модель может использоваться для коррекции межскановых яркостных различий (см. рис. 1), так как небольшие зоны их перекрытия содержат данные от одной и той же сцены. Пусть изображение включает I сканов, пронумерованных слева направо индексом $i = \overline{1, I}$. Получим относительные параметры линейных преобразований между соседними сканами, принимая левые зоны перекрытия как базовые, а правые как корректируемые:

$$\hat{r}_i = \mu_{i-1} / \mu_i, \quad \hat{c}_i = \overline{X}_{i-1} - \hat{r}_i \overline{X}_i, \quad i = \overline{2, I}, \quad (3)$$

где μ_{i-1} , $\overline{X}_{i-1}$ и μ_i , $\overline{X}_i$ - значения АКФ и средней яркости, полученные по данным зоны перекрытия для $(i-1)$ -го и i -го сканов; r_i , c_i - мультипликативный и аддитивный коэффициенты линейного преобразования данных i -го скана к $(i-1)$ -му. Абсолютные коэффициенты коррекции сканов определяются как

$$r_i = r_{i-1} \hat{r}_i, \quad c_i = c_{i-1} \hat{r}_i + \hat{c}_i, \quad i = \overline{2, I}. \quad (4)$$

Параметры коррекции первого скана (r_1 и c_1) можно найти, задав дополнительные условия, сохраняющие среднюю яркость и дисперсию изображения в целом:

$$\sum_{i=1}^I \overline{B}_i = \sum_{i=1}^I (r_i \overline{B}_i + c_i), \quad \sum_{i=1}^I D_i = \sum_{i=1}^I r_i^2 D_i, \quad (5)$$

где $\overline{B}_i$ и D_i - средняя яркость и дисперсия для i -го скана.

Алгоритмы коррекции структурных искажений при неоднородном сюжете

Рассмотрим подходы к коррекции структурных искажений для случаев, когда наблюдаемая сцена содержит резко отличающиеся по яркости объекты, которыми чаще всего выступают водная поверхность, суша и облака.

В этом случае модели (1) и (2) не обеспечивают требуемого качества коррекции [4], поскольку возникают ситуации, когда корректируемый столбец и эталон содержат данные от объектов разных классов, что порождает ошибки.

Алгоритм на основе нормирования функций распределения (алгоритм НФР). Изображению с существенно неоднородным сюжетом соответствуют многомодальные гистограммы $h_m(b)$, $m = \overline{1, M}$, которые обычно имеют два - три «горба», разделенных протяженными «впадинами». Эти гистограммы могут отличаться как по числу «горбов», так и по представительству (объему) данных в одноименных «горбах». Рассмотрим алгоритм коррекции структурных искажений, основанный на идентификации и нормировании данных, соответствующих одноименным «горбам».

Вначале формируются $F_m(b)$, $m = \overline{1, M}$, и в табличной форме находятся обратные функции $F_{mp} \rightarrow b_{mp}$, где $F_{mp} = p / (P + 1)$, $p = \overline{1, P}$. Затем фиксируется принадлежность значения яркости b_{mp} , $p = \overline{1, P}$, «горбу» ($\Delta_{mp} \leq \Delta_{m,med} + \Delta_m$) или «впадине» ($\Delta_{mp} \geq \Delta_{m,med} + \alpha \Delta_m$), где $\Delta_{mp} = b_{mp} - b_{m,p-1}$, $\Delta_{m,med} = \text{med } \Delta_{mp}$, $\Delta_{m,min} = \min \Delta_{mp}$, $\Delta_m = \Delta_{m,med} - \Delta_{m,min}$, α - коэффициент, характеризующий протяженность «впадины» ($\alpha = 3 \dots 5$).

После этого выполняется коррекция функции распределения $F_m(b) \rightarrow F_m^*(b)$ так, чтобы все $F_m^*(b)$, $m = \overline{1, M}$, в центрах «впадин» $\hat{b}_{mk}$ (k - номер «впадины») имели бы одинаковые значения:

$$F_m^*(b) = \hat{F}_{k-1} + \frac{\hat{F}_k - \hat{F}_{k-1}}{\hat{F}_{mk} - \hat{F}_{m,k-1}} (F_m(b) - \hat{F}_{m,k-1}), \quad (6)$$

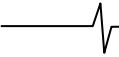
$$\hat{b}_{m,k-1} \leq b \leq \hat{b}_{mk}, \quad k = \overline{1, K},$$

$$\text{где } \hat{F}_{mk} = F_m(\hat{b}_{mk}), \quad \hat{F}_k = \frac{1}{M} \sum_m \hat{F}_{mk}, \quad \hat{F}_0 = 0.$$

Преобразования (6) обеспечивают равное представительство данных в одноименных «горбах» для всех $F_m^*(b)$, тем самым нейтрализуют изменение сюжета в строчном направлении. Далее коррекция может выполняться по аналогии с (1).

Алгоритм на основе кластеризации объектов изображения (алгоритм КОИ). Более качественные результаты дают подходы, основанные на раздельной обработке участков изображения, соответствующих одноименным объектам. Для этого необходимо использовать процедуру кластеризации. Наиболее отличающимися объектами сюжета являются водная поверхность и суша.

Рассмотрим один из таких подходов [4]. Сначала выполняется предварительная коррекция структурных искажений с использованием линейной модели. Далее элементы изображения разделяются по признаку принадлежности суше или водной поверхности с использованием двух признаков: яркость пикселя b_{mn} и дискретная производная яркости в столбцовом направлении. Яркостной порог кластеризации Z_b определяется по гистограмме $h(b)$ предварительно откорректированного изображения как точка максимума функции меж-



классовой дисперсии:

$$\sigma_B^2(b_0) = p_0(b_0)(\gamma_0(b_0) - \gamma)^2 + p_1(b_0)(\gamma_1(b_0) - \gamma)^2, \quad (7)$$

где b_0 - пробный порог;

$$p_0(b_0) = \sum_{b=0}^{b_0} h(b), p_1(b_0) = \sum_{b=b_0+1}^{B_{\max}} h(b) - \text{соответственно}$$

оценки вероятностей попадания произвольного пикселя в класс водной поверхности или суши;

$$\gamma_0(b_0) = \sum_{b=0}^{b_0} b h(b) / p_0(b_0), \gamma_1(b_0) = \sum_{b=b_0+1}^{B_{\max}} b h(b) / p_1(b_0)$$

и γ - соответственно нормированные средние яркости в пределах классов водной поверхности, суши и изображения в целом.

Можно показать [4], что

$$Z_b = \arg \max_{b_0} \frac{[\gamma p_0(b_0) - \gamma(b_0)]^2}{p_0(b_0)[1 - p_0(b_0)]}, \quad (8)$$

где $\gamma(b_0) = \sum_{b=0}^{b_0} b h(b)$ - не нормированная средняя

яркость изображения.

Порог по дискретной производной Z_{Δ} определяется аналогичным образом, он инвариантен к изменению темновых сигналов фотоприемников. Элемент изображения относится к водной поверхности при $b_{mn} \leq Z_b$ и $b_{mn} - b_{m,n-1} \leq Z_{\Delta}$, где n - номер строки изображения.

После разделения изображения на области водной поверхности и суши, коррекция структурных искажений выполняется для каждого кластера в отдельности по (1) или (2).

Рассмотренные алгоритмы позволяют выполнить коррекцию структурного шума на существенно неоднородных по яркости изображениях. Однако при слабой различимости «горбов» на гистограмме могут возникать ошибки идентификации «впадин», что приводит к потере качества коррекции.

Идентификация объектов водной поверхности и суши. Для повышения надежности функционирования алгоритмов НФР и КОИ важно получить информацию о наличии или отсутствии в каждом столбце изображения данных от водной поверхности и суши. Эта процедура строится на основе анализа эмпирических функций распределения яркости в столбцах изображения $F_m(b)$, $m=1, M$, предварительно обработанного медианным фильтром с целью устранения импульсных помех и объектов малых размеров. Для каждого столбца $m=1, M$ определяются начальная $b_n(m)$, медианная $b_m(m)$ и конечная $b_k(m)$ яркости из соотношений: $F_m(b_n(m)) = F_n$, $F_m(b_m(m)) = F_m = 0,5$, $F_m(b_k(m)) = F_k$ (экспериментально установлено, что качественные результаты получаются при $F_n = 0,01$ и $F_k = 0,99$). Далее вычисляются разброс яркости для столбца $\Delta(m) = b_k(m) - b_n(m)$ и асимметрия гистограммы $w(m) = 0,5(b_n(m) + b_k(m)) - b_m(m)$.

После этого выполняется бинаризация $b_n(m)$, $b_m(m)$, $b_k(m)$, $\Delta(m)$ и $w(m)$ по схеме, которую рассмотрим на примере $b_n(m)$. Находится среднее

$$\bar{b}_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M b_n(m) \text{ и два медианных значения:}$$

$$b_n^1 = \text{med} \{b_n(m), b_n(m) > \bar{b}_n\},$$

$$b_n^0 = \text{med} \{b_n(m), b_n(m) < \bar{b}_n\}. \quad (9)$$

На основе (9) определяется бинарная функция:

$$b_n^*(m) = \begin{cases} 0, & |b_n(m) - b_n^0| < |b_n(m) - b_n^1|, \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

Аналогично находятся бинарные функции $b_m^*(m)$, $b_k^*(m)$, $\Delta^*(m)$, $w^*(m)$, по которым столбцы изображения относятся к одному из трех множеств: «суша», «вода», «суша и вода». В m -м столбце изображения присутствует «вода» при выполнении логического условия $v(m) = b_n^*(m) \vee b_m^*(m) \vee b_k^*(m) \vee \Delta^*(m) \vee w^*(m)$. Наличие данных от «суши» определяется выражением $l(m) = b_n^*(m) \vee b_m^*(m) \vee b_k^*(m) \vee \Delta^*(m) \vee w^*(m)$. Столбец относится к множеству «вода», если $v(m) \wedge l(m) = b_n^*(m) \wedge b_m^*(m) \wedge b_k^*(m) \wedge \Delta^*(m) \wedge w^*(m)$, к множеству «суша», если $v(m) \wedge l(m) = b_n^*(m) \wedge b_m^*(m) \wedge b_k^*(m) \wedge \Delta^*(m) \wedge w^*(m)$, и к множеству «суша и вода» при $v(m) \wedge l(m) = \Delta^*(m) \vee w^*(m)$.

Рассмотренная процедура используется как предварительный этап алгоритмов НФР и КОИ для повышения точности и ускорения вычислительного процесса. Во-первых, исключается ложная идентификация, когда объекты одного класса относятся к объектам другого. Во-вторых, столбцы изображения, содержащие объекты одного класса, не подвергаются процедурам нормирования функций распределения и кластеризации.

Алгоритм на основе фильтрации неоднородного сюжета (алгоритм ФНС). Рассмотрим алгоритм, использующий несколько другие принципы. Обозначим некоторый корректируемый столбец изображения как B_m . Рассмотрим относительно него симметричную апертуру из $(2S+1)$ столбцов. Разобьем эту апертуру в кадровом направлении на равновеликие фрагменты $B_{v,m}$, $v=1, V$, включающие по N_{ϕ} строк. В пределах фрагмента для каждого столбца $s = -S, S$ вычислим значения АКФ:

$$\mu_{v,m+s} = \frac{1}{N_{\phi}-1} \sum_{j=1}^{N-1} b_{v,m+s,j} b_{v,m+s,j+1} - \frac{1}{(N_{\phi}-1)^2} \sum_{j=1}^{N-1} b_{v,m+s,j} \sum_{j=1}^{N-1} b_{v,m+s,j+1}, \quad (11)$$

$$s = -S, S, v = 1, V.$$

Эталонное значение АКФ для v -го фрагмента определим как

$$\hat{\mu}_{v,m} = \text{med}_s (\mu_{v,m+s}, s = -S, S).$$

В этом случае отфильтровываются данные по тем столбцам фрагмента, сюжет которых резко отличается от сюжета большинства столбцов. Мультипликативный коэффициент коррекции для k -го столбца определяется с учетом (2) как

$$g_m = \text{med}_v \left(\sqrt{\hat{\mu}_{v,m} / \mu_{v,m}}, v = 1, V \right).$$

Здесь также медианный фильтр выбирает из множества фрагментов наиболее представительный отсчет

мультипликативного коэффициента, отбраковывая аномальные значения.

При определении аддитивных коэффициентов для каждого фрагмента используется единый мультипликативный коэффициент g_m :

$$a_{mv} = \text{med}_s \left(\frac{1}{N_\phi} \sum_{j=1}^N b_{v,m+s,j}, s = \overline{-S, S} \right) - \frac{g_m}{N_\phi} \sum_{j=1}^N b_{vmj}, \quad (12)$$

а его итоговое значение для корректируемого столбца находится как

$$a_m = \text{med}_v (a_{mv}, v = \overline{1, V}), \quad m = \overline{1, M}.$$

Использование медианного фильтра объясняется теми же соображениями.

На рис. 3 представлен результат обработки участка многосканового изображения с использованием алгоритма яркостного выравнивания сканов (4) и алгоритма ФНС.

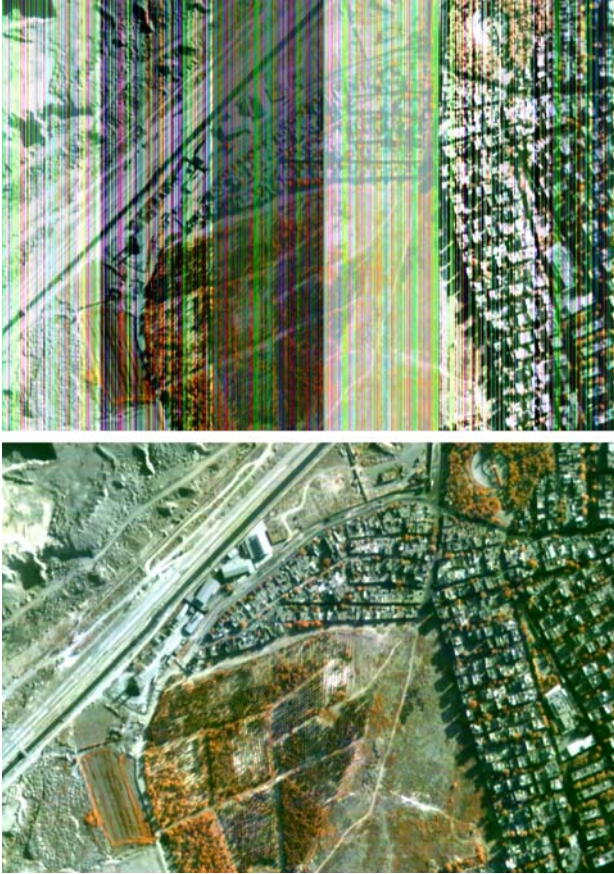


Рис. 3. Изображение до (вверху) и после коррекции

Модели коррекции времязависимых структурных искажений

Экспериментально установлено, что отдельные типы фотоприемных элементов по аналогии с человеческим зрением при переходе от светлых объектов к темным изменяют свою чувствительность. Сигнал от поверхности Земли представляет собой случайное поле, аналитически описать которое практически невозможно. Поэтому рассмотренные выше модели, в основе которых положена предпосылка о неизменности передаточных характеристик фотоприемных элементов в процессе формирования изображения, позволяет решить задачу

коррекции структурных искажений лишь частично. В связи с этим рассмотрим статистические модели структурных искажений и алгоритмы их коррекции, которые учитывают изменение чувствительностей фотоприемных элементов во времени.

Времязависимая полиномиальная модель. Будем считать, что изменение чувствительности датчика носит мультипликативный характер и может быть представлено полиномом $P_n(m)$ степени J . Его коэффициенты $\alpha_{jn}, j = \overline{0, J}$, можно отыскать, минимизируя различия между корректируемой строкой изображения и окружающей ее симметричной апертурой из $(2a+1)$ строк, принимаемой за эталон:

$$R_n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-a}^a [B_{mn} P_n(m) - B_{m,n+i}]^2 = \min, \quad (13)$$

где $B_{mn}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}$ - яркость пикселя с координатами (n, m) .

Коэффициенты полинома находятся из системы

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=-a}^a [B_{mn} P_n(m) - B_{m,n+i}] B_{mn} m^j = 0, \quad j = \overline{0, J},$$

которая приводится к линейной относительно $\alpha_{jn}, j = \overline{0, J}$:

$$\begin{aligned} & \alpha_{0n} \sum_{m=1}^M B_{mn}^2 m^j + \alpha_{1n} \sum_{m=1}^M B_{mn}^2 m^{j+1} + \alpha_{2n} \sum_{m=1}^M B_{mn}^2 m^{j+2} + \dots = \\ & = \frac{1}{2a+1} \sum_{m=1}^M \left(B_{mn} m^j \sum_{i=-a}^a B_{m,n+i} \right), \quad j = \overline{0, J}. \end{aligned}$$

Мультипликативная модель хотя и является адекватным описанием времязависимых структурных искажений, но при значительном уровне видеосигнала приводит к значительным ошибкам. Это связано с тем, что малые ошибки в определении коэффициентов полинома приводят к значительным ошибкам коррекции видеоданных.

Менее чувствительной к погрешностям является аддитивная полиномиальная модель. Переход к ней основывается на том факте, что мультипликативные изменения сигнала могут быть скомпенсированы аддитивными добавками в виде соответствующего полинома. В этом случае по аналогии с (13) запишем:

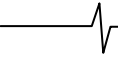
$$R_n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-a}^a [B_{mn} + P_n(m) - B_{m,n+i}]^2 = \min, \quad (14)$$

откуда следует система линейных уравнений для определения коэффициентов полинома:

$$\begin{aligned} & \alpha_{0n} \sum_{m=1}^M m^j + \alpha_{1n} \sum_{m=1}^M m^{j+1} + \alpha_{2n} \sum_{m=1}^M m^{j+2} + \dots = \\ & = \frac{1}{2a+1} \sum_{m=1}^M \left[m^j \sum_{i=-a}^a B_{m,n+i} \right] - \sum_{m=1}^M m^j B_{mn}, \quad j = \overline{0, J}. \end{aligned}$$

Чтобы оценить точность полиномиальной модели рассмотрим более общий случай аддитивно-мультипликативного описания структурных искажений с учетом аддитивного некоррелированного шума:

$$\sum_{m=1}^M [(B_{nm} + \varepsilon_{nm}) K_n(m) + C_n(m) - B_{nm}^*]^2 = \min, \quad (15)$$



где ε_{nm} - значение шума в m -м элементе n -й строки;

$$K_n(m) = \sum_{i=0}^P p_i m^i - \text{функция изменения чувствительности}$$

для n -й строки в виде полинома степени P ;

$$C_n(m) = \sum_{j=0}^S s_j m^j - \text{функция изменения темнового сигнала}$$

в виде полинома степени S ; B_{nm}^* - эталонный сигнал, найденный по апертуре из $(2a+1)$ строк, в которой n -я строка центральная.

Найдем коэффициенты полиномов $K_n(m)$ и $C_n(m)$ из условий:

$$\frac{\partial R_n}{\partial p_i} = 0, \quad \frac{\partial R_n}{\partial s_j} = 0, \quad i = \overline{0, P}, \quad j = \overline{0, S}. \quad (16)$$

Преобразуем первое уравнение из (16) с учетом соотношений

$$\sum_{m=1}^M B_{nm} \varepsilon_{nm} K_n(m) m^i = 0, \quad \sum_{m=1}^M C_n(m) \varepsilon_{nm} m^i = 0,$$

$$\sum_{m=1}^M B_{nm} \varepsilon_{nm} m^i = 0, \quad i = \overline{0, P},$$

которые определяются характером шума. В результате получим:

$$\sum_{m=1}^M [B_{nm}^2 K_n(m) + C_n(m) B_{nm} - B_{nm}^* B_{nm}] m^i + \Delta = 0,$$

$$\text{где } \Delta = \sum_{m=1}^M \varepsilon_{nm}^2 K_n(m) m^i - \text{методическая ошибка,}$$

обусловленная шумом ε_{nm} с дисперсией

$$D_\varepsilon = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \varepsilon_{nm}^2.$$

Влияние шума усиливается с повышением степени полинома $K_n(m)$, поскольку резко возрастает m^i , а $K_n(m) \approx 1$.

Полиномиальные модели с высокой точностью описывают изменение характеристик фотодатчика во времени, но содержат методическую ошибку, зависящую от интенсивности случайного шума и степени полинома. Последнее, в частности, обязывает ограничить степень полинома сверху, что приводит к погрешностям на динамических сюжетах, требующих для своего описания функции с большим числом степеней свободы. В данном случае более высокое качество коррекции времязависимых искажений могут обеспечить кусочно-линейные модели.

Кусочно-линейная мультипликативная модель. Установлено, что рассматриваемые времязависимые искажения вызваны изменением коэффициента усиления фотоприемника. Опишем коррекцию структурного шума в виде мультипликативного коэффициента k_{nm} для каждого пикселя изображения.

Рассмотрим на изображении скользящую прямоугольную апертуру, состоящую из $(2a+1)$ строк и $(2b+1)$ столбцов. При соответствующем выборе b можно считать, что чувствительность фотодатчика α_q (q - номер строки) постоянна для каждой строки апертуры. Корректируемым является центральный пиксель

апертуры с координатами (n, m) в системе координат изображения и $(0, 0)$ в системе координат апертуры.

Поскольку фотоприемник при неизменном темновом сигнале c преобразует входной сигнал E_{qv} (v - номер столбца) в яркость: $B_{qv} = \alpha_q E_{qv} + c$, то

$$\mu_q = \frac{1}{2b} \sum_{v=-b}^{b-1} B_{qv} B_{q, v+1} - \frac{1}{4b^2} \sum_{v=-b}^{b-1} B_{qv} \sum_{v=-b}^{b-1} B_{q, v+1},$$

где μ_q - АКФ яркостей пикселей изображения, связанная с АКФ входного сигнала μ_q^* как $\mu_q = \alpha_q^2 \mu_q^*$. Приняв в качестве эталонной АКФ

$$\mu_0^* = \left(\frac{1}{2a+1} \sum_{q=-a}^a \sqrt{\mu_q} \right)^2,$$

найдем корректирующий множитель для центрального пикселя апертуры:

$$k_{nm} = \frac{1}{\alpha_q} = \sum_{q=-a}^a \sqrt{\mu_q} / [(2a+1) \sqrt{\mu_0}]. \quad (17)$$

После чего скорректированное значение яркости B_{nm}^* вычисляется как $B_{nm}^* = \text{ent}(B_{nm} k_{nm} + 0, 5)$.

Достоинством кусочно-линейной мультипликативной модели является нечувствительность к величине темнового сигнала c .

Визуально структурные искажения в виде «полосатости» снимка воспринимаются как неоднородности средней яркости, в то время как процедура (17) направлена на коррекцию СКО яркости в центральной строке по отношению к СКО яркости апертуры. Поэтому кусочно-мультипликативную модель можно модифицировать так, чтобы она корректировала именно среднюю яркость.

Найдем медианную яркость q -й строки апертуры $B_q = \alpha_q E_q + c$, где E_q - медианное значение входного сигнала. Тогда медиана яркости по всей апертуре

$$\bar{B} = \text{med}_{q \in (-a, a)} (\alpha_q E_q) + c.$$

Выравнивание средней яркости можно обеспечить мультипликативным коэффициентом

$$k_{nm} = \frac{\bar{B}}{B_q} = \frac{\text{med}_{q \in (-a, a)} (\alpha_q E_q) + c}{\alpha_0 E_0 + c}. \quad (18)$$

Коррекция выполняется согласно выражению $B_{nm}^* = (\alpha_{nm} E_{nm} + c) k_{nm} = \alpha_{nm}^* E_{nm} + c^*$. Как видим, по (18) корректируется не только чувствительность $\alpha_{nm}^* = k_{nm} \alpha_{nm}$, но и темновой сигнал фотоприемника $c^* = k_{nm} c$. Так как $k_{nm} \approx 1$, а $c \ll B_q$, то методическая ошибка, связанная с изменением темнового сигнала, незначительна. Она возрастает при уменьшении средней яркости, когда c и B_q сопоставимы по величине.

Как отмечалось выше, небольшие погрешности в определении мультипликативного коэффициента при значительном уровне сигнала могут приводить к снижению качества коррекции. В данном случае кусочно-линейная мультипликативная модель путем соответствующего выбора размеров апертуры может быть заменена кусочно-линейной аддитивной моделью, дающей более устойчивое по точности решение.

Кусочно-линейная аддитивная модель. Покажем, что мультипликативную модель в пределах апертуры можно

заменить аддитивной. Действительно, на выходе фотоприемника имеем сигнал $B = \alpha E + c$, линейно связанный со входным сигналом E . После уточнения чувствительности $\alpha \rightarrow \alpha^*$; $B^* = \alpha^* E + c = (\alpha + \Delta\alpha)E + c = B + \Delta\alpha E$. В первом приближении аддитивная модель коррекции может быть выполнена как $B^* = B + \Delta\alpha E$, где $\bar{E}$ - среднее значение входного сигнала. Такое приближение достаточно точно описывает искажения, поскольку изменения E в апертуре незначительны по отношению к флуктуациям $\bar{E}$, что практически всегда подтверждается.

Следовательно, искажения, вызванные изменением чувствительности α вдоль строки, могут быть компенсированы с использованием кусочно-аддитивной модели коррекции. Для центральной (корректируемой) строки апертуры и для всей апертуры сформируем эмпирические функции распределения кодов яркости $F_0(b)$ и $F_p(b)$. Для них в табличной форме вычислим обратные функции $F_{0p}(b) \rightarrow b_{0p}$ и $F_p(b) \rightarrow b_p$, где $F_{0p}(b) = F_p(b) = p/(P+1)$, $p = \overline{1, P}$. Далее найдем ряд разностей $\tau_p = b_p - b_{0p}$, $p = \overline{1, P}$. Корректирующая добавка для центрального пикселя апертуры $\Delta_{nm} = \text{med } \tau_p, p = \overline{1, P}$. После чего коррекция яркости выполняется как

$$B_{nm}^* = \text{ent}(B_{nm} + \Delta_{nm} + 0,5). \quad (19)$$

При резких перепадах яркости внутри апертуры статистические характеристики центральной строки могут значительно отличаться по отношению к аналогичным характеристикам апертуры. В этом случае необходима дополнительная фильтрация измерений Δ_{nm} по множеству соседних положений апертуры. Экспериментально установлено, что хорошие результаты дает медианный фильтр, который заменяет значение Δ_{nm} , найденное в конкретной апертуре, медианным значением Δ_{nm}^* измерений, найденным по окружающим апертурам: $\Delta_{nm}^* = \text{med } \Delta_{nm}, m = \overline{1, M}$.

В качестве примера на рис. 4 представлен фрагмент исходного изображения и результат его обработки, выполненной с использованием кусочно-линейной аддитивной модели.

Рассмотренные модели обладают математической строгостью и адекватно описывают времязависимые структурные искажения в «идеальных» условиях: отсутствии шумов, достаточно представительной выборке и статистической однородности сюжета. На практике приходится иметь дело со снимками, имеющими различные особенности, формальный учет которых представляет значительную сложность: случайный шум, динамично изменяющийся сюжет, импульсные помехи, ограниченность выборки видеоданных и др. Поэтому рассмотренные модели имеют различную чувствительность к подобному рода особенностям, что определяет область их применения. В частности, полиномиальные модели имеют методическую ошибку, зависящую от уровня случайного шума. Кусочно-линейная мультипликативная модель при небольших объемах выборки не обеспечивает необходимого качества коррекции, в силу больших флуктуаций значений АКФ, а ее модификация, учитывающая среднюю яркость, имеет методическую ошибку, которая становится заметной при высоких значениях

темнового сигнала фотодатчика и при снижении средней яркости изображения.

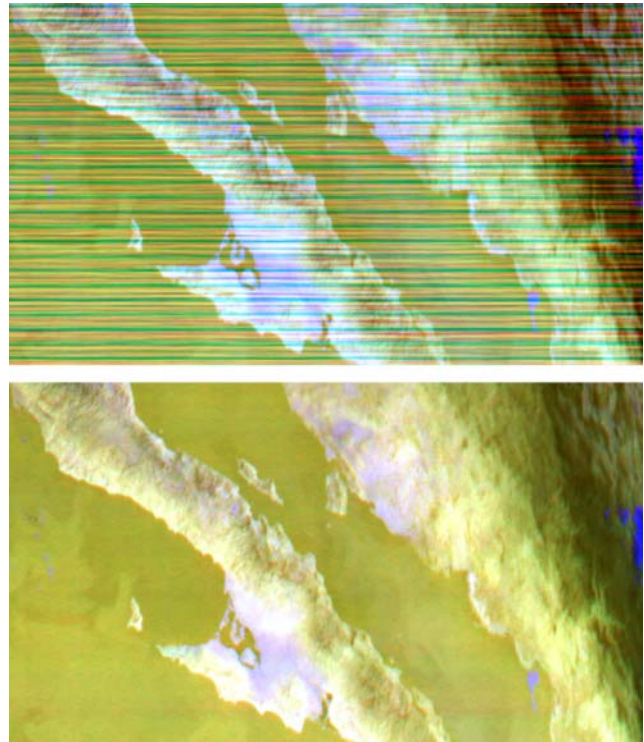


Рис. 4. Коррекция времязависимых структурных искажений

Обработка натурной информации со спутника «Метеор-М» подтвердила, что предложенные модели и алгоритмы позволяют устранять времязависимые структурные искажения на изображениях, когда алгоритмы, основанные на детерминированных моделях, оказываются неработоспособными.

Заключение

Рассмотренные выше статистические алгоритмы яркостной коррекции изображений апробированы на реальной видеoinформации, полученной от космических систем «Ресурс-О1», «Монитор-Э» и «Ресурс-ДК» и «Метеор-М». По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Рассмотренные подходы по статистической коррекции структурных искажений на изображениях от многоэлементных датчиков, содержащих существенно отличающиеся по яркости объекты, позволяют качественно решить эту задачу, в то время как традиционно используемые алгоритмы [1, 2] не обеспечивают необходимого качества коррекции.

Относительная погрешность коррекции структурных искажений с использованием алгоритмов, основанных на нормировании функций распределения, кластеризации изображения и фильтрации неоднородности сюжета, составила порядка (0,2-0,3)%, так что остаточные искажения становятся визуально незаметными.

2. Предложенные алгоритмы коррекции времязависимых структурных искажений позволяют с высокой точностью решить эту задачу, в то время как алгоритмы, основанные на детерминированных коэффициентах, не дают качественного результата.

Относительная погрешность коррекции времязависимых структурных искажений составляет (0,25-0,35)%, так что остаточные искажения становятся неразличимы для оператора.

3. Относительная погрешность яркостного выравнивания сканов на изображениях от КА «Ресурс-ДК» рассмотренным выше алгоритмом не превышает 0,3%.

Рассмотренные модели и алгоритмы в тех или иных модификациях с учетом прикладной области, реализованы в виде программных модулей и используются в Научном центре оперативного мониторинга Земли и Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» для обработки изображений, получаемых от отечественных и зарубежных систем дистанционного зондирования Земли.

Работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2015 годы (госконтракт № П2422).

Литература

1. Thome K. J., Growther B. G., Biggar S. F., Reflectance – and irradiance – based calibration of LandSat-5 thematic mapper // Canadian journal of remote sensing, 1997, volume 23, No 4. P. 108-115.
2. Злобин В.К., Еремеев В.В.. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. 286 с.
3. Еремеев В.В., Зенин В.А. Радиометрическая нормализация изображений от многоматричных сканирующих

устройств // Цифровая обработка сигналов. Вып. 3. 2009. – С. 31-35.

4. Зенин В.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И. Алгоритм радиометрической коррекции изображений с неоднородным сюжетом, полученных от космического аппарата «Ресурс-ДК» // Вестник РГРТУ. Вып. 23, Рязань 2008. С. 43-48.

STATISTICAL MODELS OF CORRECTION OF STRUCTURAL DISTORTIONS ON SATELLITE IMAGES OF A TERRESTRIAL SURFACE

Eremeev V.V., Zenin V.A.

The correction problem in space pictures of a terrestrial surface of the structural distortions caused by change in time of transfer characteristics of photoreception elements of the video gauge is considered. The common decision of this problem, and also the approaches focused on correction of images, containing essentially non-uniform objects on brightness are presented. Questions of correction of video data from multimatrix scanners, including approaches under indemnification nonconstant structural distortions are considered. Results of processing of real pictures are resulted.



УДК 004.932: 528.831

ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Еремеев В.В., зам. главного конструктора филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», директор НИИ «Фотон» РГРТУ, д.т.н., e-mail: foton@rsreu.ru

Князьков П.А., аспирант, РГРТУ, НИИ «Фотон», м.н.с., e-mail: foton@rsreu.ru

Козлов Е.П., к.т.н., РГРТУ, НИИ «Фотон», с.н.с., e-mail: foton@rsreu.ru

Москвитин А.Э., к.т.н., РГРТУ, НИИ «Фотон», с.н.с., e-mail: foton@rsreu.ru

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космические изображения, пространственное разрешение, радиометрическое разрешение, точность координатной привязки, электронные карты, статистический анализ.

Введение

Важнейшими техническими характеристиками систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются их пространственное и радиометрическое разрешение, а также точность координатной привязки объектов наблюдаемой сцены. Оценки этих характеристик, полученные в ходе предполетных калибровок и испытаний систем ДЗЗ, не характеризует в полной мере качество получаемых изображений при их эксплуатации из-за невозможности учета условий съемки и изменений характеристик видеодатчиков [1-2]. В тоже время, как и любой другой информационный продукт, спутниковые изображения должны сопровождаться показателями качества, которые определяют возможность их использования по назначению. В настоящей работе рассматриваются технологии высокоточной оценки указанных выше характеристик на основе статистического анализа получаемых изображений.

Технология оценки пространственного разрешения изображения основана на последовательном выполнении следующих действий. Сначала на изображении отбираются два набора фрагментов $\Phi_B \in \{\Phi_{Bk}, k=1, \bar{K}\}$ и $\Phi_G \in \{\Phi_{Gl}, l=1, \bar{L}\}$, содержащих соответственно вертикально и горизонтально ориентированные контрастные границы однородных по яркости объектов (например, крыши домов на границе с тенью). Поскольку операции обработки фрагментов Φ_B и Φ_G абсолютно идентичны, то в дальнейшем индексы «В» и «Г» опустим, используя $\Phi \in \{\Phi_k, k=1, \bar{K}\}$. Далее формируются аналитические описания границ перепадов яркости $x \in \{x_k(m), k=1, \bar{K}\}$, где $x_k(m)$ - функция границы для k -го фрагмента, m - номер строки фрагмента. Затем определяется функция рассеяния края $G(x)$ в результате комплексирования результатов измерений по множеству фрагментов после предварительного приведения их к единому углу наклона границ и к единым нижнему и верхнему уровням яркости. На заключительном этапе осуществляется кусочно-полиномиальная аппроксимация $G(x)$, формирование функции рассея-

Представлены технологии оценки пространственного и радиометрического разрешения, а также точности координатной привязки элементов земной поверхности на космических изображениях. Эти технологии основаны на статистическом анализе объектов наблюдаемой сцены: резких яркостных перепадов, шумовой компоненты изображения, корреляционном совмещении одноименных участков снимков и электронной карты. Приведены результаты экспериментальных исследований точности и надежности решения поставленных задач с привлечением реальных спутниковых изображений.

ния линии как $F(x) = dG(x)/dx$ и частотно-контрастной характеристики $T(f) = |\Omega(f)|/|\Omega(0)|$, где $\Omega(f) = \mathfrak{F}[F(x)]$, $\mathfrak{F}$ - преобразование Фурье.

Радиометрическое разрешение обычно измеряется отношением сигнал/шум и характеризует меру различимости полезного сигнала на фоне шума. Технология оценки радиометрического разрешения основана на описании шума аддитивной независимой моделью и использовании известного свойства автокорреляционной функции (АКФ): $\hat{K}_0 = K_0 + D_\varepsilon$; $\hat{K}_\tau = K_\tau$ при $\tau = 1, 2, \dots$, где $\hat{K}_\tau$ и K_τ - зашумленные и не зашумленные отсчеты АКФ, D_ε - дисперсия шума. Вначале отбираются однородные по яркости фрагменты изображения $\Phi \in \{\Phi_s, s=1, \bar{S}\}$. Для каждого столбца отобранных фрагментов вычисляется АКФ. В качестве аналитической модели АКФ в работе обоснован выбор трехпараметрической модели $K_\tau = a + c\tau^\gamma$, для которой параметры a и c определяются по отсчетам $\hat{K}_1$ и $\hat{K}_2$, а параметр γ - из условия минимизации ошибки оценки D_ε .

Технология оценки точности координатной привязки снимков основана на использовании электронных карт (ЭК) и предполагает реализацию трех основных процессов [3]. Во-первых, на заданный регион съемки формируется достаточно точная электронная карта в системе координат изображения. На карте определяется множество информативных опорных фрагментов, имеющих уникальную геометрическую форму и устойчивых во времени. Во-вторых, выполняется поиск координат одноименных точек опорных фрагментов на изображении и карте. Ниже рассматривается полностью автоматический процесс поиска одноименных точек на снимке и карте. Это достигается использованием бинарных масок, которые по яркости и геометрической форме соответствуют аналогичным объектам снимка. В-третьих, на основе координат одноименных точек снимка и карты выполняется оценка качества координатной привязки изображения.

Оценка пространственной разрешающей способности

Формирование набора фрагментов. По реальному изображению формируется набор фрагментов $\Phi \in \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}$, например, с вертикально ориентированными границами (рис. 1). Для этих границ величина перепада яркости на местности в горизонтальном направлении должна быть многократно меньше оцениваемой разрешающей способности.

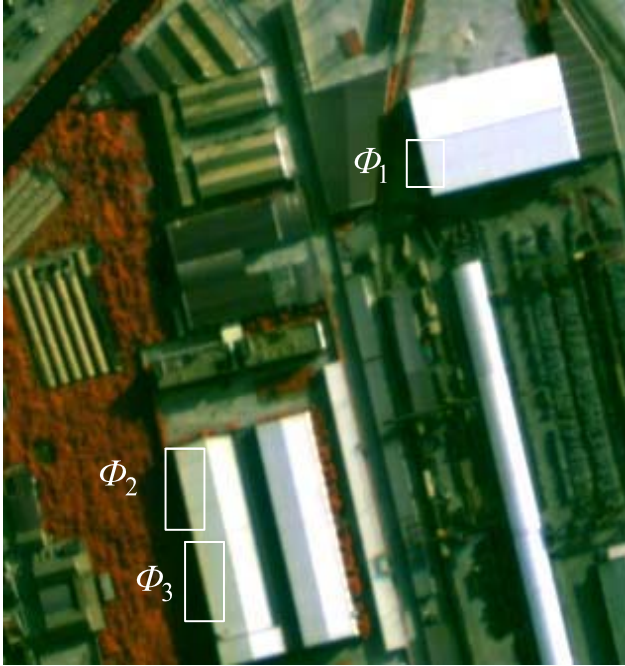


Рис. 1. Набор фрагментов с вертикально ориентированными границами

Аналитическое описание резких краев. Для набора фрагментов $\Phi \in \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}$ находятся аналитические описания резких краев яркости $x \in \{x_k(m), k = \overline{1, K}\}$. Для этого сначала в каждой строке определяется пиксель, содержащий резкий край с помощью индикатора яростного перепада $\gamma_{kmn} = |B_{kmn}^I - B_{kmn}^{II}|$, где B_{kmn}^I и B_{kmn}^{II} - средние значения отсчетов яркости в левой и правой частях скользящей апертуры, имеющей четное число элементов $2a$. Положение контура в каждой строке уточняется до долей пикселя как «центр тяжести»:

$$N_{km} = \frac{\sum_{i=i_{km}-a-1}^{i_{km}+a+1} i \gamma_{kmi}}{\sum_{i=i_{km}-a-1}^{i_{km}+a+1} \gamma_{kmi}},$$

где $i_{km} = \arg \max(\gamma_{kmn})$. На основе координат (m, N_{km}) по МНК находятся аналитические описания резких краев

$$X_k(m) = \sum_{i=0}^S a_{ki} m^i, \quad k = \overline{1, K}.$$

Получение функции рассеяния края. На основе $x \in \{x_k(m), k = \overline{1, K}\}$ осуществляется восстановление функции рассеяния края (ФРК) $G_k(x)$ как $G_k(n - X_k(m)) = \Phi_k(m, n)$, $m = \overline{1, M_k}$, $n = \overline{1, N_k}$, $k = \overline{1, K}$. Аргументом функции $G_k(x)$ является расстояние от пикселя фрагмента до перепада по оси n , а ее значением - яркость этого пикселя. При переходе от одной строки к соседней пиксели приближаются или

удаляются от наклонной границы на субпиксельные расстояния, чем и достигается формирование ФРК с высокой точностью.

Для комплексирования результатов измерений $G_k(x)$, $k = \overline{1, K}$, с уровнями яркости $G_{Лк}$ и $G_{Пк}$ они приводятся к единым нижнему $G_{Л}$ и верхнему $G_{П}$ уровням:

$$\hat{G}_k(x) = \left(\frac{G_{Л} - G_{П}}{G_{Лк} - G_{Пк}} \right) (G_k(x) - G_{Лк}) + G_{Л},$$

$$k = \overline{1, K},$$

(1)

где $\hat{G}_k(x)$ - скорректированные ФРК.

Кроме этого, $G_k(x)$, $k = \overline{1, K}$, необходимо привести к единому углу наклона границы $\theta = \pi/2$. Можно показать, что при «наполнении» эллипсoidalной апертуры с полуосями a и b на границу, наклоненную к горизонтальной оси под углом θ_k , следует изменить масштаб $\hat{G}_k(x)$ по оси x в $\mu_{\theta k} = \sqrt{1 + (b/a)^2 \operatorname{ctg}^2 \theta_k}$ раз (рис 2).

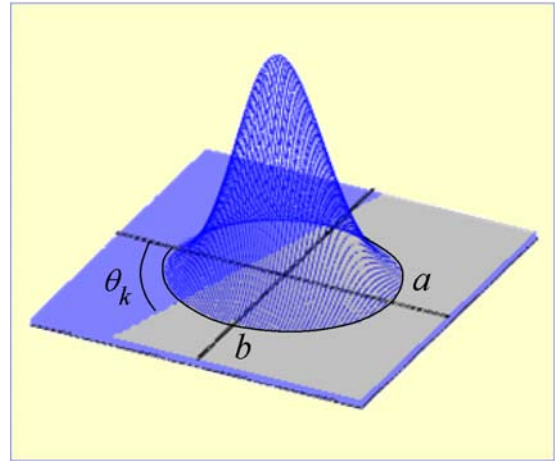


Рис. 2. Учет наклона контура

В результате формируется искомая функция рассеяния края

$$G(x) = \bigcup_{k=1}^K \hat{G}_k(x \mu_{\theta k}),$$

которая содержит измерения от всех фрагментов. На основе полученных с высокой детальностью отсчетов $G(x)$ последовательно находятся отсчеты функции рассеяния линии (ФРЛ), частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) и оценивается линейное разрешение (ЛР) изображения.

Определение ФРЛ, ЧКХ и ЛР. Формально ФРЛ $F(x) = dG(x)/dx$. В тоже время $G(x)$ представили выше как набор точек, определенных в общем случае в нерегулярной решетке. Исследованы различные подходы фильтрации измерений, составляющих $G(x)$ [4]. Установлено, что наилучшие результаты обеспечивает кусочно-полиномиальный подход. В области определения ФРЛ задаются регулярно расположенные узловые точки x_0 , используемые как центральные точки скользящей апертуры с размером $2a$ (рис. 3). На основе точек $G(x)$, попавших в апертуру, по МНК строится полином $P(x) = p_0 + p_1(x - x_0) + p_2(x - x_0)^2 + p_3(x - x_0)^3$, коэффициенты которого определяются из условия

$$\sum_i [P(x_i) - G(x_i)]^2 = \min, \quad x_i \in [x_0 - a, x_0 + a].$$

Уточненное значение отсчета ФРК в центральной точке апертуры x_0 определяется коэффициентом p_0 , а отсчет ФРЛ (рис. 4) как

$$F(x_0) = \left| \frac{dP(x)}{dx} \right|_{x=x_0} = p_1.$$

ЧКХ $T(f)$, как уже отмечалось, находится путем нормирования модуля частотного представления ФРЛ. Линейное разрешение R видеоданных определяется полупериодом частоты $f_{0,5}$, на которой исходный контраст ЧКХ $T(f)$ уменьшается наполовину: $R = 0,5/f_{0,5}$.

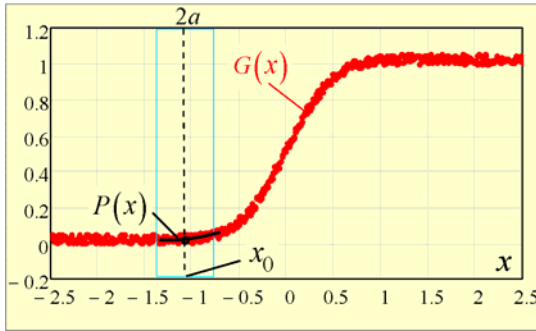


Рис. 3. Кусочно-полиномиальная аппроксимация ФРК

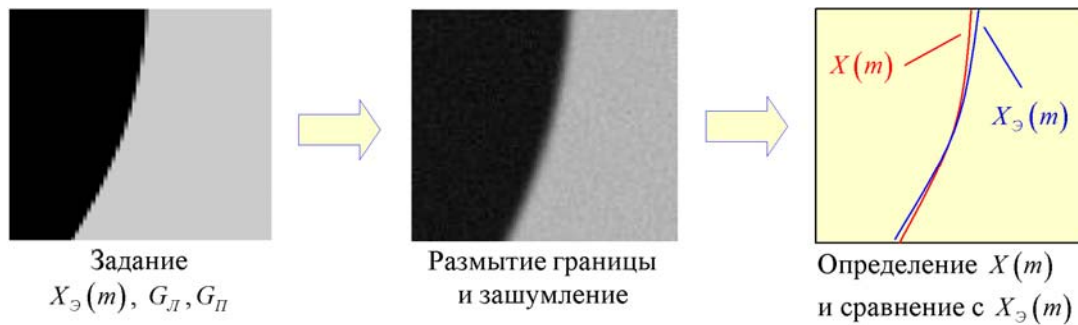


Рис. 4. Схема аттестации процесса определения аналитического описания границ

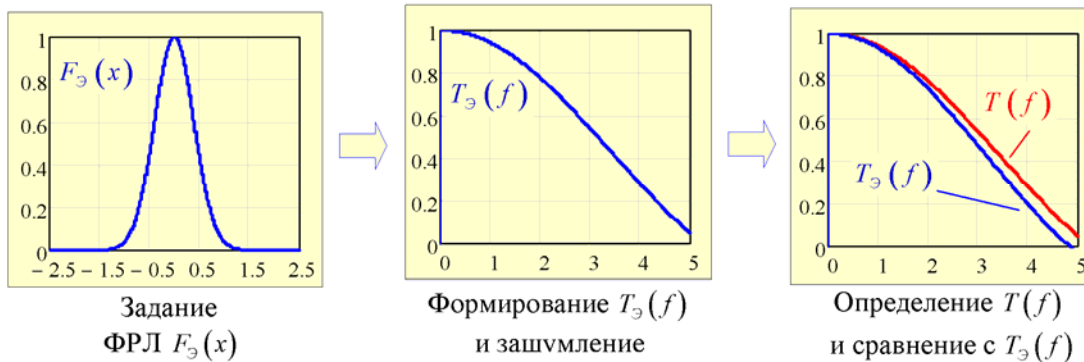


Рис. 5. Схема аттестации процессов определения ФРК, ФРЛ, ЧКХ и ЛР

Технология оценки радиометрической разрешающей способности

Определение параметра модели АКФ. Для степенной модели АКФ $K_\tau = a + c\tau^\gamma$ определим такой параметр γ , при котором достигается наилучшее в некотором смысле согласование модели с статистическими свойствами реального изображения. Выберем на изображении один или несколько однородных по яркости прямоугольных участков, считая, что i -й столбец,

Аттестация технологии. Выполнены экспериментальные исследования точности определения аналитического описания контура $X(m)$ по схеме рис. 4.

Вначале формировалось изображение, содержащее идеальный яркостной перепад с уровнями G_L и G_P и координатами $X_3(m)$. Этот перепад «размывался» низкочастотным фильтром и в изображение добавлялся аддитивный шум. По рассмотренной выше технологии определялось аналитическое описание границы $X(m)$ и сопоставлялось с заданным $X_3(m)$. По серии снимков установлено, что СКО ошибки нахождения $X(m)$ не превышает 10^{-4} пикселя.

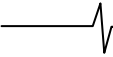
Выполнены оценки точности определения ФРК, ФРЛ, ЧКХ и ЛР по схеме рис. 5.

Вначале задавались отсчеты эталонной функции рассеяния линии $F_3(x)$ в виде Гауссоиды. По $F_3(x)$ на основе известных математических соотношений формировались ФРК $G_3(x)$, ЧКХ $T_3(f)$, ЛР R_3 и зашумлялись. По рассмотренной выше технологии определялись $G(x)$, $F(x)$, $T(f)$ и R и сопоставлялись с эталонными $G_3(x)$, $F_3(x)$, $T_3(f)$, R_3 . Установлено, что СКО ошибки определения ФРК, ФРЛ, ЧКХ и ЛР не превышает 2 % от единицы измерений этих функций при СКО добавляемого шума $\sigma_{ш} \leq 1$ градации яркости.

$i = \overline{1, N}$, формируется i -м фотоприемным элементом видеодатчика. Каждый фотоприемный элемент обладает вполне определенными передаточными характеристиками (чувствительностью и темновым сигналом). Полагая, что дисперсия шума D_ε для выбранного участка неизменна, определим параметр γ из условия:

$$R = \sum_{i=1}^N (\hat{K}_{0i} - a_i - D_\varepsilon)^2 = \min, \quad (3)$$

где $a_i = K_{1i} + (K_{1i} - K_{2i})x$, $x = (2^\gamma - 1)^{-1}$, K_{1i} , K_{2i} -



значения АКФ для i -го столбца изображения при $\tau = 1, 2$. Значения K_{τ} , найденные по столбцам изображения, не зависят от параметров линейных передаточных характеристик фотоприемных элементов видеодатчика. Выражение (3) определяет такое значение γ , при котором минимизируется разброс оценок дисперсий шума, найденных для множества столбцов. Искомые параметры D_{ε} и x определяются из системы

$$dR/dD_{\varepsilon} = 0, \quad dR/dx = 0. \quad (4)$$

Первое уравнение дает соотношение

$$D_{\varepsilon} = \bar{K}_0 - \bar{K}_1 - (\bar{K}_1 - \bar{K}_2)x, \quad (5)$$

где черта над переменными означает операцию усреднения по множеству столбцов. Второе равенство из (4) приводится к виду:

$$\begin{aligned} & \bar{K}_{0i}\bar{K}_{1i} - \bar{K}_{0i}\bar{K}_{2i} - D_{\varepsilon}(\bar{K}_{1i} - \bar{K}_{2i}) - \\ & - \bar{K}_{1i}(K_{1i} - K_{2i}) - (\bar{K}_{1i} - \bar{K}_{2i})^2 x = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6), получим x :

$$x = \frac{\bar{K}_0 K_1 - \bar{K}_0 K_2 - (\bar{K}_1 - \bar{K}_2)(\bar{K}_0 - \bar{K}_1) - \bar{K}_1^2 + \bar{K}_1 K_2}{(\bar{K}_1 - \bar{K}_2)^2 - (\bar{K}_1 - \bar{K}_2)^2}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5), найдем D_{ε} . Параметр модели АКФ γ определяется из выражения

$$x = (2^{\gamma} - 1)^{-1} : \gamma = \frac{1}{\ln 2} \ln \left(1 - \frac{1}{x} \right).$$

Оценка дисперсии шума по адаптивной модели АКФ. Точность оценки дисперсии шума D_{ε} можно повысить, если исходный набор видеоданных определенным образом разбить на K отдельных групп, найти для каждой k -й группы оптимальное значение параметра модели АКФ γ_k , $k = \overline{1, K}$, выполнить оценки дисперсий $D_{\varepsilon k}$ и на основе их определить итоговую D_{ε} . То есть в данном случае модель адаптируется путем изменения параметра γ_k , $k = \overline{1, K}$, для каждой группы в зависимости от ее статистических свойств. Поскольку параметр γ характеризует поведение АКФ, то столбцы исходного набора данных логично упорядочить по мере возрастания γ_i , $i = \overline{1, N}$. После этого упорядоченный набор столбцов разбивается на K групп, для которых выполняется оценка γ_k , $k = \overline{1, K}$. Для этого вначале определяется оптимальное значение γ для всего набора данных и затем на его основе по критерию (3) для каждого столбца оценивается γ_i как

$$\gamma_i = \frac{1}{\ln 2} \ln \left(\frac{a_i - K_{2i}}{a_i - K_{1i}} \right), \quad i = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Упорядоченный набор столбцов разбивается на K групп так, чтобы диапазоны изменения параметра γ в каждой группе были бы примерно равными.

Параметры модели $K_{k\tau} = a_k + c_k \tau^{\gamma_k}$ для каждой k -й группы определяются из условия

$$R = \sum_k \sum_i (\hat{K}_{0ki} - a_{ki})^2 - (\bar{K}_0 - \bar{a})^2 = \min, \quad (9)$$

где $a_{ki} = K_{1ki} + (K_{1ki} - K_{2ki})x_k$,

$$\bar{a} = \bar{K}_1 + \frac{1}{K} \sum_k (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})x_k, \quad x_k = (2^{\gamma_k} - 1)^{-1},$$

$\bar{K}_{1k}$ и $\bar{K}_{2k}$ - средние значения K_{1ki} и K_{2ki} для k -й группы. По аналогии с (3) условие (9) определяет такие значения параметров γ_k , $k = \overline{1, K}$, при которых минимизируются разбросы оценок дисперсий в каждой из сформированных групп.

Искомые параметры x_k , $k = \overline{1, K}$, определяются из системы уравнений $dR/dx_k = 0$, $k = \overline{1, K}$.

Система приводится к матричной форме

$$\begin{bmatrix} (\alpha_1 S_1 - \beta_1) + \alpha_1 S_2 + \dots + \alpha_1 S_K \\ \alpha_2 S_1 + (\alpha_2 S_2 - \beta_2) + \dots + \alpha_2 S_K \\ \dots \\ \alpha_K S_1 + \alpha_K S_2 + \dots + (\alpha_K S_K - \beta_K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \dots \\ \omega_K \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $\alpha_k = \frac{1}{K}(\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})$, $k = \overline{1, K}$,

$$S_k = (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k}), \quad \beta_k = (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})^2,$$

$$\omega_k = (\bar{K}_0 - \bar{K}_1)(\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k}) + \bar{K}_{1k}^2 - \bar{K}_{0k} K_{1k} + \bar{K}_{0k} K_{2k} - \bar{K}_{1k} K_{2k}.$$

Определив из (10) x_k , $k = \overline{1, K}$, оценим дисперсии шума в каждой k -й группе:

$$D_{\varepsilon k} = \bar{K}_{0k} - \bar{K}_{1k} - (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})x_k, \quad (11)$$

и путем их усреднения найдем итоговую оценку D_{ε} .

В рамках произвольной k -й группы формируется $D_{\varepsilon k}$ как результат усреднения $D_{\varepsilon ki}$, $i = \overline{1, N_k}$, где N_k - число столбцов в k -й группе. Поэтому

$$D(D_{\varepsilon k}) = D(D_{\varepsilon ki})/N_k, \quad k = \overline{1, K}.$$

Итоговая оценка D_{ε} определяется как взвешенное среднее

$$D_{\varepsilon} = \sum_{k=1}^K (N_k/N) D_{\varepsilon k},$$

поэтому дисперсия этой оценки находится как

$$D(D_{\varepsilon}) = \sum_{k=1}^K (N_k/N)^2 D(D_{\varepsilon k}).$$

Аттестация технологии. Оценки дисперсии шума D_{ε} по (5) и (11) являются несмещенными. Действительно, пусть a_i определено с ошибкой Δ_i по отношению к истинному значению a_i^* , т.е. $a_i = a_i^* + \Delta_i$. В этом случае (3) запишется как

$$R = \sum_i \left[(\hat{K}_{0i} - a_i^*) - D_{\varepsilon} - \Delta_i \right]^2 = \min.$$

Поскольку $(\hat{K}_{0i} - a_i^*) = D_{\varepsilon}$, то $R = \sum_i \Delta_i^2$. Поэтому

$$R = \sum_i \left[(\Delta_i - \bar{\Delta}) + \bar{\Delta} \right]^2 = \sum_i (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 + (\bar{\Delta})^2 = \min.$$

Деля последнее выражение на $N-1$, получим $R = D(\Delta) + (\bar{\Delta})^2 = \min$. Дисперсия $D(\Delta)$ не зависит от общего смещения Δ_i , поэтому $R = \min$ при $\bar{\Delta} = 0$, что и доказывает несмещенность оценки D_{ε} .

Оценка D_{ε} формируется как среднее значение $D_{\varepsilon i}$, $i = \overline{1, N}$. Поэтому ее точность определяется дисперсией $D(D_{\varepsilon})$ и может быть оценена как $D(D_{\varepsilon}) = D(D_{\varepsilon i})/N$, где $D(D_{\varepsilon i})$ легко оценивается по набору $D_{\varepsilon i}$, $i = \overline{1, N}$.

В результате проведения экспериментов на 25 участках с размерами 512x512 элементов значение СКО $\sigma(D_\varepsilon) = \sqrt{D(D_\varepsilon)}$ не превысило 0,02. Следовательно, эта технология может быть использована для оценки уровня шума, сопоставимого с шумом квантования по яркости, дисперсия которого составляет 1/12.

Технология оценки точности координатной привязки

Формирование опорных фрагментов. На наблюдаемую сцену из электронной карты отбираются уникальные опорные объекты, соответствующие объектам снимка (рис. 6, слева), в виде изломов береговых линий



и преобразуются из векторного формата в растровый. Степень уникальности опорных фрагментов $E_i = \{(x_j, y_j); j = \overline{1, J}\}, i = \overline{1, I}$, определяется средне-квадратичным отклонением $\sigma_i, i = \overline{1, I}$, точек береговой линии $(x_j, y_j), j = \overline{1, J}$, от прямой $y = k_i x + b_i$:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [y_j - (b_i + k_i x_j)]^2 + \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [x_j - (b_i + k_i y_j)]^2, \quad (12)$$

где $k_i, b_i, i = \overline{1, I}$, находятся из условий

$$\sum_j (b_i + k_i y_j - x_j)^2 = \min \text{ и } \sum_j (b_i + k_i x_j - y_j)^2 = \min.$$



Рис. 6. Уникальный фрагмент снимка (слева) и бинарная маска (справа)

Для каждого опорного фрагмента $E_i, i = \overline{1, I}$, формируется бинарная маска $A_i, i = \overline{1, I}$. Эта маска содержит две области с различными уровнями яркости, которые разделяются участком линии карты (рис. 6, справа). Затем для этих фрагментов формируются на снимке более расширенные зоны поиска $B_i, i = \overline{1, I}$ (см. рис. 6, слева).

Совмещение снимка с картой. В качестве меры близости фрагментов снимка и карты рассматривается коэффициент корреляции, который с учетом бинарного представления маски сводится к вычислению выражения

$$\rho = \frac{\overline{B_1 - B_0}}{\sqrt{D_B}} \cdot \frac{\sqrt{q_1 q_0}}{q_1 + q_0}, \quad (13)$$

где $\overline{B_1}, \overline{B_0}$ и q_1, q_0 - средние значения яркостей снимка и число точек единичной и нулевой областями маски. В данном случае определение ρ сводится к подсчету средних яркостей под различными областями маски, чем достигается высокое быстродействие рассматриваемой технологии.

В конечном счете по множеству одноименных точек $\{(x_i, y_i), (x_i^*, y_i^*); i = \overline{1, I}\}$ определяются полиномы

$$P_x(x_i, y_i) = \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^m a_{n, m-n} x_i^n y_i^{m-n},$$

$$P_y(x_i, y_i) = \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^m b_{n, m-n} x_i^n y_i^{m-n}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (14)$$

устанавливающие геометрическое соответствие снимка и карты. Коэффициенты $a_{n, m-n}$ и $b_{n, m-n}, m = \overline{0, p}, n = \overline{0, m}$, в выражении (14) находятся из условий:

$$\sum_i (P_x(x_i, y_i) - x_i)^2 = \min, \quad \sum_i (P_y(x_i, y_i) - y_i)^2 = \min.$$

При решении рассматриваемой задачи мешающее действие оказывает наличие облаков, теней, движущихся объектов, частично или полностью закрывающих опорные фрагменты (рис. 7, слева и в центре); неполное соответствие геометрии береговой линии на снимке и электронной карте (рис. 7, справа); неравномерное распределение уникальных фрагментов по полю изображения. Рассмотрим ряд конструктивных решений, направленных на нейтрализацию действия этих факторов.

Устранение систематических ошибок. Несовпадение береговой линии на снимке и опорном фрагмента (рис. 7, справа) приводит к систематической ошибке. В работе [3] показано, что величина этой ошибки определяется степенью их геометрического сходства, которая описывается выражением:

$$\rho = [1 - (\alpha + \beta)][1 + 2(D_0 + D_1)/(\overline{B_1} - \overline{B_0}) + 2(\alpha - \beta)(D_1 - D_0)/(\overline{B_1} - \overline{B_0})^2 - (\alpha - \beta)^2]^{-0.5}, \quad (15)$$

где α и β - доля элементов суши под нулевой областью маски и доля элементов водной поверхности под единичной областью («чужие» элементы), D_0 и D_1 - выборочные дисперсии изображения под нулевой и единичной областями бинарной маски.



Рис. 7. Наличие облаков (слева), движущихся объектов и теней (в центре) и несовпадение береговой линии на снимке и карте (справа)

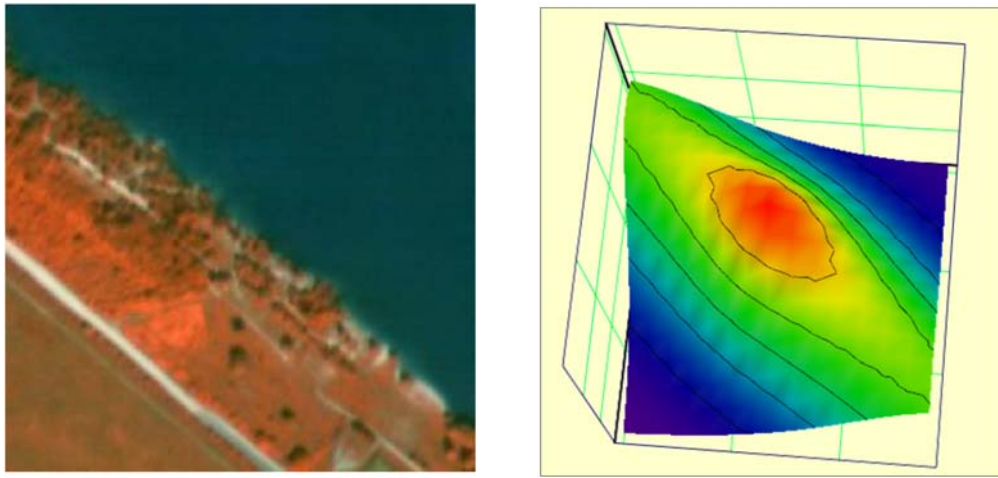


Рис. 8. Фрагмент снимка с линейной береговой линией (слева) и его АКФ (справа)

Из (13) и (15) следует, что коэффициент корреляции зависит от соотношения суммы $(\alpha + \beta)$ и разности $(\alpha - \beta)$, в результате точка наилучшего сходства в общем случае смещается. Для устранения подобного рода систематических ошибок следует использовать асимметричные бинарные маски, в результате чего выражение (15) принимает вид

$$\rho = [1 - \alpha - \beta][\gamma(1 - \gamma)]^{0.5} \times [\pi(1 - \pi) + \pi D_0 / (\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2 + (1 - \pi) D_1 / (\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2]^{-0.5}, \quad (16)$$

где $\pi = \beta + \gamma(1 - \alpha - \beta)$, γ и $(1 - \gamma)$ – соответственно доля нулевой и единичной областей маски. В этом случае ρ принимает максимальное значение при

$$\gamma = \left(1 + \sqrt{\frac{D_0 + \alpha(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2}{D_1 + \beta(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2}} \right)^{-1}. \quad (17)$$

Только при полном совпадении E с E_B , т.е. при $\alpha = \beta = 0$, систематическая ошибка отсутствует. В этом случае равенство $\rho = \rho_{\max}$ достигается либо путем конструирования несимметричной маски с параметром $\gamma = \sqrt{D_1} / (\sqrt{D_0} + \sqrt{D_1})$, либо при равенстве дисперсий $D_0 = D_1$ для симметричной маски ($\gamma = 0.5$).

Использование фрагментов с линейными участками. Для увеличения набора опорных фрагментов выполняется привлечение фрагментов карты, которые содержат почти прямолинейные береговые линии (рис. 8, слева).

Установлено, что изолинии АКФ опорных фрагментов имеют форму, близкую к эллипсу, направления осей m и n которого определяются ориентацией береговой линии (рис. 8, справа). Поэтому геометрическое соответствие снимка и карты можно найти из условий:

$$\sum_{i=1}^L (K_{ni} \Delta n_i^2) = \min, \quad \sum_{i=1}^L (K_{mi} \Delta m_i^2) = \min, \quad (18)$$

где K_{ni} и K_{mi} – весовые коэффициенты, определяющие различную степень доверия по направлениям m и n для i -го фрагмента,

$$\Delta n_i = [P_x(x_i, y_i) - x_i] \cos \alpha_i - [P_y(x_i, y_i) - y_i] \sin \alpha_i, \\ \Delta m_i = [P_x(x_i, y_i) - x_i] \sin \alpha_i + [P_y(x_i, y_i) - y_i] \cos \alpha_i, \\ \alpha_i - \text{угол между системами координат } x y \text{ и } m n, i = 1, I.$$

Экспериментально установлено, что за счет использования фрагментов с линейными участками береговых линий набор опорных фрагментов расширяется примерно на 30%.

Отбраковка отдельных участков опорного фрагмента. Выполнение этой операции основано на многокритериальном анализе наличия мешающих образований и несовпадений снимка и карты на отдельных участках опорного фрагмента. Бинарная маска разбивается на L участков $A_i = \{A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^L\}$, $i = 1, I$. В процессе совмещения A_i^l , $i = 1, I$, $l = 1, L$, с соответствующим участком снимка B_i^l , $i = 1, I$, $l = 1, L$, рассчитываются критерии отбраковки K_i , $i = 1, I$. Если участок не удовлетворяет хотя бы одному из критериев K_i ,

$i = \overline{1, I}$, то он отбраковывается. На основе (13) с использованием не отбракованных участков рассчитывается коэффициент корреляции:

$$\rho^* = 0.5 \frac{\sum_{j=1}^J (\bar{B}_{1j} - \bar{B}_{0j})}{\sum_{j=1}^J \sqrt{D_{Bj}}} \quad (19)$$

Аттестация технологии. Рассогласования координат одноименных точек снимка x_{bi} , y_{bi} и карты x_{ei} , y_{ei} определяются как

$$x_{bi} - x_{ei} = \Delta_{xi} \pm 3\sigma_x, \quad y_{bi} - y_{ei} = \Delta_{yi} \pm 3\sigma_y, \quad i = \overline{1, I}, \quad (20)$$

где Δ_{xi} , Δ_{yi} - систематические погрешности привязки по осям x и y , а σ_x и σ_y - СКО случайных погрешностей.

Для определения погрешности технологии координатной привязки вначале координаты карты (x_{ei}, y_{ei}) , $i = \overline{1, I}$, преобразуются по зависимостям (14) в (x_{ei}^*, y_{ei}^*) , тем самым исключаются систематические ошибки. После этого точность координатной привязки оценивается через СКО $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$, где

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (x_{bi} - x_{ei}^*)^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (y_{bi} - y_{ei}^*)^2} \quad (21)$$

По результатам экспериментальной оценки точности координатной привязки снимков по описанной технологии с использованием изображений от КА «Ресурс-ДК» установлено:

- СКО методической ошибки σ составляет 0.5 пикс.;
- СКО случайной ошибки составляет 0.06 пикс.

Заключение

Рассмотренные технологии оценки пространственно- и радиометрического разрешения, а также точности координатной привязки объектов изображения экспериментально исследованы с привлечением реальных изображений от КА «Ресурс-ДК», «Метеор-М» и «MeteoSAT-8». По результатам этих исследований можно сделать следующие выводы.

1. Технология оценки пространственного разрешения обеспечивает точность решения этой задачи не хуже 2%. Этот высокий показатель обеспечивается благодаря ряду конструктивных решений:

- высокоточному координатному описанию границы резкого края яркости на основе помехозащищенного индикатора яркостного перепада и алгоритма субпиксельного уточнения координат границ;

- комплексированию результатов измерений по множеству фрагментов, содержащих различные по геометрии и яркости резкие края, на основе приведения их к единому углу ориентации и яркостным уровням;

- высокоточному восстановлению функции рассеяния линии путем кусочно-полиномиальной аппроксимации объединенной функции рассеяния края.

2. Технология оценки радиометрического разрешения обеспечивает измерение СКО шума с точностью порядка 0,2 градации яркости. Такая высокая точность оценки уровня шума обеспечивается благодаря введению адаптивной модели АКФ, адекватно описывающей статистические свойства видеоданных.

3. Технология оценки точности координатной привязки объектов изображений обеспечивает точность решения этой задачи не хуже 0.5 пикселя. Надежность и точ-

ность этой технологии достигается за счет:

- представления опорных фрагментов в виде бинарных масок;
- введения процедуры оценки степени уникальности опорных фрагментов;
- использования алгоритмов учета степени несовпадения одноименных объектов снимка и карты, анализа и учета степени закрытия облаками опорных объектов.

На базе рассмотренных технологий в настоящее время создается комплекс анализа и оценки качества космических изображений земной поверхности, ориентированный на использования информации от вновь проектируемых космических систем ДЗЗ «Ресурс-П», «Электро-Л», «Канопус-В» и др.

Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.740.11.0002).

Литература

1. Rangaswamy M. K. Quickbird II Two-dimensional On-orbit Modulation Transfer Function Analysis Using Convex Mirror Array. South Dakota State University. M.S. thesis. 2003. 149 p.
2. Markham B. The Landsat Sensors' Spatial Responses // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-23, No. 6, 1985. P.864-875.
3. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П. Нормализация космических изображений Земли на основе их сопоставления с электронными картами // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С.21-26.
4. Еремеев В.В., Князьков П.А., Москвитин А.Э. Оценка разрешающей способности аэрокосмических изображений на основе их статистического анализа // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С.27-30.
5. Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка отношения «сигнал/шум» оптико-электронных приборов по изображениям земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научн. статей. М.: Изд-во Института космических исследований РАН. 2009. Вып. 6. Т. I. С.160-166.

TECHNOLOGY ANALYSIS AND EVALUATION OF QUALITY OF SPACE IMAGES

Eremeev V.V., Knyazkov P.A., Kozlov E.P., Moskvitin A.E.

A technology assessment of the spatial and radiometric resolution and accuracy of the coordinates of the binding elements of the Earth surface on space images. These technologies are based on statistical analysis of the objects observed scene: sharp edges in brightness, the noise component images, the correlation matching of like images sites and e-maps. The experimental results of the accuracy and reliability of the solution of tasks involving real satellite images.

Keywords: remote sensing, space images, spatial resolution, radiometric resolution, accuracy of coordinate affixment, statistical analysis.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАННЫХ ОТ МНОГОМАТРИЧНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Кузнецов А.Е., главный конструктор проекта филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», зам. директора НИИ «Фотон» РГРТУ, д.т.н., e-mail: foton@rsreu.ru
Пошехонов В.И., аспирант РГРТУ, НИИ «Фотон», м.н.с.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, стереофотограмметрическая обработка, спектрально-зональная съемка, стереоизображение.

Введение

Один из принципов одновременной регистрации изображений подстилающей поверхности в нескольких спектральных диапазонах заключается в пространственном разделении потока лучистой энергии по нескольким оптико-электронным преобразователям (ОЭП). Для этого в фокальной плоскости сканирующего устройства устанавливаются с небольшим смещением друг относительно друга вдоль направления полета спутника одиночные линейки или составные матрицы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) с одномоментной регистрацией или работающие в режиме накопления заряда. Для обеспечения спектрально-зональной съемки перед каждым ОЭП устанавливают соответствующие полосовые светофильтры. Преимущество данного подхода заключается в отсутствии традиционно используемой при построении сканирующих устройств сложной и дорогостоящей спектроделительной системы, которая приводит к ослаблению регистрируемого сигнала и снижению радиометрического разрешения видеоинформации. В соответствии с рассмотренным принципом спроектированы: съемочное устройство высокого разрешения «Геотон-Л1» космического аппарата (КА) «Ресурс-ДК», аппаратура комплекса многозональной сканерной съемки (КМСС) гидрометеорологического спутника «Метеор-М», а также съемочные устройства на перспективном КА «Ресурс-П».

Однако вследствие использования принципа пространственного разделения потока лучистой энергии наблюдение одних и тех же объектов подстилающей поверхности в разных спектральных диапазонах происходит, во-первых, с небольшой временной задержкой, а во-вторых, под разными углами от надира. С одной стороны это создает сложности при геометрическом совмещении снимков для решения задачи цветосинтеза [1], с другой – возникает возможность стереофотограмметрической обработки спектрально-зональных изображений, что позволяет на принципиально новом уровне в оперативном режиме решать задачи:

- объемного дешифрирования наблюдаемых объектов;
- формирования карт параметров облачности – высоты верхней границы и скорости движения – для гидро-

Рассматривается решение новых задач стереофотограмметрической обработки спектрально-зональных изображений, формируемых многоматричными сканирующими устройствами с пространственным разделением потока лучистой энергии. Представлены особенности спроектированной для решения данных задач информационной технологии, приводятся примеры выходных продуктов, сформированных по реальным данным.

рометеорологических исследований;

- сегментации облачных образований при каталогизации с целью оценки качества информации;
- создания растровых 3D-моделей подстилающей поверхности.

Технология стереофотограмметрической обработки

В настоящей работе рассматриваются особенности спроектированной для решения перечисленных задач информационной технологии, предполагающей выполнение следующих основных этапов:

- геометрическая калибровка съемочного устройства;
- внешнее и взаимное геодезическое ориентирование спектрально-зональных снимков;
- формирование анаглифического стереоизображения;
- идентификация одноименных точек и формирование карты диспаратности;
- определение высот объектов с помощью прямой фотограмметрической засечки;
- формирование выходных информационных продуктов.

Геометрическая калибровка съемочного устройства

Определение трехмерных координат объектов по стереопарам основано на восстановлении пространственного положения визирных лучей, сформировавших изображения одноименных точек. Поэтому к точности геометрических параметров съемочной системы предъявляются достаточно высокие требования. Отсюда встает задача калибровки съемочного устройства, направленная на устранение погрешностей, которые вызваны ошибками определения элементов внутреннего ориентирования, включая дисторсию оптической схемы объектива, низкой точностью задания конструктивных углов установки на платформу КА съемочного устройства и навигационных приборов, измеряющих параметры внешнего ориентирования в процессе съемки.

Каждая n -я строка изображения $I(m, n)$ от видеодатчика сканового принципа действия формируется в соответствующий момент времени $t = t_0 + n/f$, где t_0 – время начала формирования видеоданных, f – строчная частота сканирования. С помощью интерполяции навигационных измерений для произвольного момента времени t рассчитываются: вектор $\mathbf{p}(t)$ пространственного положения КА в гринвичской геоцентрической системе координат (ГСК); матрица поворота $\mathbf{R}_{ГН}(t)$, связывающая приборную систему координат (ПСК) прибора астроориентации с ГСК.

Для стереофотограмметрической обработки изображений необходимо для произвольного пикселя (m, n) определить единичный вектор $\mathbf{r}_Г(m, n) = (r_x, r_y, r_z)^T$ направляющих косинусов соответствующего визирного луча в ГСК. Запишем математическое выражение, связывающее искомый вектор $\mathbf{r}_Г(m, n)$ с направлением визирного луча $\mathbf{r}_П(m)$ в приборной системе координат съёмочного устройства,

$$\mathbf{r}_Г(m, n) = \mathbf{R}_{ГН}(t) \mathbf{R}_{НС} \mathbf{R}_{СП} \mathbf{r}_П(m),$$

где $\mathbf{R}_{СП}$ – матрица перехода от ПСК съёмочного устройства к связанной системе координат (ССК) КА; $\mathbf{R}_{НС}$ – матрица перехода от ССК к ПСК прибора астроориентации; компоненты вектора $\mathbf{r}_П(m)$ определяются фокусным расстоянием объектива, физическим размером светочувствительного элемента и расположением ПЗС-линейки в фокальной плоскости.

Заметим, что уточнение рассмотренных параметров по опорной картографической информации представляет сложную техническую задачу, поскольку: во-первых, на координатные рассогласования в опорных точках влияют как статические ошибки геометрии съёмочной системы, так и динамические ошибки навигационных измерений; во-вторых, искомые параметры, определяющие геометрию съёмочной системы, взаимосвязаны между собой и разделить их влияние оказывается затруднительно. Показано, что с целью калибровки съёмочной системы вектор $\mathbf{r}_Г$ направления визирного луча в ПСК прибора астроориентации возможно описать полиномиальной функцией в зависимости от номера m светочувствительного элемента ПЗС-линейки, что позволяет сократить до минимума число калибруемых параметров и упрощает последующую процедуру их определения,

$$\mathbf{r}_Г(m) = \sum_{i=0}^N \mathbf{a}_i m^i, \quad \mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T,$$

$$\mathbf{r}_Г(m) = \mathbf{A} \mathbf{m}, \quad \mathbf{A} = [\mathbf{a}_0 \mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_N], \quad \mathbf{m} = (1, m, m^2, \dots, m^N)^T.$$

Матрица $\mathbf{A}$ определяется для каждой ПЗС-линейки $\lambda = \overline{1, L}$ съёмочного устройства. С учетом этого определим искомое направление $\mathbf{r}_{Г\lambda}$ визирного луча в гринвичской геоцентрической системе координат,

$$\mathbf{r}_{Г\lambda}(m, n) = \mathbf{R}_{ГН}(t) \mathbf{A}_\lambda \mathbf{m}.$$

Для определения элементов матриц $\mathbf{A}_\lambda$, $\lambda = \overline{1, L}$ используем опорные точки местности, для которых применим сквозную нумерацию. Тогда номер точки $k = \overline{1, K}$ однозначно определяет её геоцентрические координаты $\mathbf{g}_k = (X_k, Y_k, Z_k)^T$, а также соответствую-

щие пиксельные координаты (m_k, n_k) на изображении, сформированном сканером с номером λ на j -м витке. Введем обозначения,

$$\mathbf{p}_{j,k} = \mathbf{p}(t_{j,k}), \quad \mathbf{B}_{j,k} = \mathbf{R}_{ГН}(t_{j,k}), \quad t_{j,k} = t_{0j} + n_k/f.$$

Тогда координаты $\hat{\mathbf{g}}_k$ ближайшей точки, лежащей на визирном луче, сформировавшим изображение пикселя (m_k, n_k) , равны

$$\hat{\mathbf{g}}_k = \mathbf{p}_{j,k} + s_k \mathbf{r}_k,$$

$$\text{где } s_k = (\mathbf{g}_k - \mathbf{p}_{j,k}) \mathbf{r}_k / |\mathbf{r}_k|^2, \quad \mathbf{r}_k = \mathbf{B}_{j,k} \mathbf{A}_\lambda \mathbf{m}_k.$$

Отсюда получим уравнение вектора невязок,

$$\mathbf{d}(m_k, n_k, X_k, Y_k, Z_k) = \mathbf{g}_k - \hat{\mathbf{g}}_k = \mathbf{0}, \quad k = \overline{1, K}.$$

Для более точного определения взаимной ориентации ПЗС-линеек дополнительно подключим общие точки $(m_{c\lambda}, n_{c\lambda})$, $c = \overline{1, C}$, идентифицируемые одновременно на изображениях всех спектральных каналов $\lambda = \overline{1, L}$. Введем в рассмотрение дополнительные мешающие параметры $(\tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c)$, соответствующие неизвестным геоцентрическим координатам изображенного в одноименных точках объекта местности. Отсюда,

$$\mathbf{d}(m_{c\lambda}, n_{c\lambda}, \tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c) = \mathbf{0}, \quad c = \overline{1, C}, \quad \lambda = \overline{1, L}.$$

Обозначим символом $\boldsymbol{\theta}$ – вектор неизвестных параметров, который включает компоненты $a_{i,j}^{(\lambda)}$ матриц $\mathbf{A}_\lambda$ и геоцентрические координаты $(\tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c)$. Заметим, что вектор невязок $\mathbf{d}$ зависит от ряда величин, измеряемых с ошибками: координаты (m, n) опорных и общих точек на изображениях, геоцентрические координаты (X, Y, Z) опорных точек, углы (α, ω, κ) ориентации КА, определяющие матрицу $\mathbf{R}_{ГН}(t)$. Обозначим через $\boldsymbol{\zeta}$ вектор истинных, без влияния ошибок, значений рассмотренных величин, которые должны удовлетворять следующим зависимостям:

$$\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{e}_k(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{d}(m_k, n_k, X_k, Y_k, Z_k), \quad k = \overline{1, K},$$

$$\mathbf{e}_{K+Lc+\lambda}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{d}(m_{c\lambda}, n_{c\lambda}, \tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c), \quad c = \overline{1, C}, \quad \lambda = \overline{1, L}.$$

Измерения величин $\boldsymbol{\zeta}$ содержат случайные ошибки, таким образом, наблюдаются зашумленные значения $\mathbf{z} = \boldsymbol{\zeta} + \boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon} \propto N(0, \mathbf{V}_0)$, где $\mathbf{V}_0$ – ковариационная матрица погрешностей $\boldsymbol{\varepsilon}$. Тогда определение искомых параметров $\boldsymbol{\theta}$ сводится к решению задачи минимизации функционала $Q(\boldsymbol{\zeta}) = (\mathbf{z} - \boldsymbol{\zeta})^T \mathbf{V}_0^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\zeta}) \rightarrow \min$ с ограничениями $\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{0}$. Введем обозначения матриц Якоби $\mathbf{S}$ и $\mathbf{T}$ функций $\mathbf{e}$ относительно векторов $\boldsymbol{\zeta}$ и $\boldsymbol{\theta}$ соответственно,

$$\mathbf{S} = \left[\left(\frac{\partial e_j(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta})}{\partial \zeta_k} \right) \right], \quad \mathbf{T} = \left[\left(\frac{\partial e_j(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta})}{\partial \theta_k} \right) \right],$$

где производные оценим численно с помощью конечных разностей.

Поставленная задача минимизации решается итерационно с помощью определения поправок $\delta \boldsymbol{\zeta}_a$ и $\delta \boldsymbol{\theta}_a$ к текущим значениям $\boldsymbol{\zeta}_a$ и $\boldsymbol{\theta}_a$ по формулам [2]:

$$\delta \boldsymbol{\theta}_a = \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}_a = -\mathbf{C}_a^{-1} \mathbf{T}_a^T \mathbf{D}_a^{-1} [\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}_a, \boldsymbol{\zeta}_a) + \mathbf{S}_a (\mathbf{z} - \boldsymbol{\zeta}_a)],$$

где $C_a = T_a^T D_a^{-1} T_a$, $D_a = S_a V_0 S_a^T$.

$$\delta \zeta_a = \hat{\zeta} - \zeta_a = z - \zeta_a -$$

$$V_0 S_a^T D_a^{-1} [e(\theta_a, \zeta_a) + S_a (z - \zeta_a) + T_a \delta \theta_a]$$

В результате на каждой итерации $a = 1, 2, \dots$ получим новые оценки θ_{a+1} , ζ_{a+1} ,

$$\theta_{a+1} = \theta_a + \delta \theta_a, \quad \zeta_{a+1} = \zeta_a + \delta \zeta_a.$$

После достижения сходимости ковариационную матрицу $D[\hat{\theta}]$ полученных на последней итерации параметров $\hat{\theta}$ оценим выражением

$$D[\hat{\theta}] \approx \hat{\sigma}^2 [T^T (S V_0 S^T)^{-1} T]^{-1},$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{q-p} (z - \hat{\zeta})^T V_0^{-1} (z - \hat{\zeta}),$$

где p , q – число элементов векторов неизвестных параметров θ и измерений ζ соответственно.

Апробация рассмотренного алгоритма калибровки выполнена по съемочным устройствам среднего разрешения КМСС. Для каждого спектрального канала измерялись координаты порядка 300 опорных точек по снимкам Landsat с точностью $\sigma = 50$ м. В результате точность геодезической привязки изображений составила $\sigma = 84.1$ м для камер МСУ-100 и $\sigma = 93.2$ м для МСУ-50. При этом погрешность взаимного ориентирования отдельных каналов не превышает $2''$, что соответствует требованиям решения задач стереообработки.

Внешнее и взаимное ориентирование снимков

В случае если навигационные измерения КА обладают недостаточной точностью, выполняется ориентирование снимков с использованием координат общих и опорных точек. Это позволяет уменьшить погрешности последующего определения трехмерных координат объектов, более точно совмещать изображения при создании анаглифического стереоизображения. На данном этапе для дальнейшей обработки выбираются два изображения $I_1(m_1, n_1)$, $I_2(m_2, n_2)$ – как правило, полученных от наиболее разнесенных в фокальной плоскости ПЗС-линеек, для которых стереобаза и, соответственно, точность расчетов максимальна.

Далее на снимках идентифицируются одноименные точки с помощью алгоритма корреляционно-экстремального поиска. Для опорных точек предусмотрена возможность автоматического измерения координат с использованием базы абрисов – небольших фрагментов изображений объектов местности с известными геодезическими координатами. Ориентирование заключается в минимизации рассмотренного ранее вектора невязок $d(m, n, X, Y, Z)$ для всех общих и опорных точек. Множество уточняемых в процессе ориентирования параметров зависит от установленных на КА навигационных приборов и точности выдаваемых ими измерений. Как правило, корректируются угловые элементы внешнего ориентирования, в отдельных случаях – параметры временной привязки видеоданных.

Формирование анаглифического стереоизображения

Создание стереопары заключается в геометрическом трансформировании исходных снимков с целью

совмещения эпиполярных линий и строк анаглифического стереоизображения. Эпиполярная линия – проекция визирного луча, соответствующего заданному пикселю одного из исходных снимков, на второе изображение. Учитывая особенность формирования спектрально-наличных изображений на одном витке полета спутника с небольшой временной задержкой, эпиполярные линии будут практически совпадать со столбцами исходных снимков. Поэтому вначале выполним трансформирование изображения $I_2(m_2, n_2)$ в систему координат базового $I_1(m_1, n_1)$ с целью устранения систематических взаимных искажений, обусловленных вращением и кривизной Земли, не стабильностью углов ориентации КА и др. Для этого используем уравнения геопривязки $\varphi = \Phi_i(m_i, n_i)$, $\lambda = F_i(m_i, n_i)$, $i = 1, 2$, задающие геодезические координаты точки пересечения визирного луча, соответствующего пикселю (m_i, n_i) , с выбранным референц-эллипсоидом,

$$\begin{cases} m_1 = \Phi_1^{-1}[\Phi_2(m_2, n_2), F_2(m_2, n_2)], \\ n_1 = F_1^{-1}[\Phi_2(m_2, n_2), F_2(m_2, n_2)], \end{cases}$$

где обратные функции $m_1 = \Phi_1^{-1}(\varphi, \lambda)$, $n_1 = F_1^{-1}(\varphi, \lambda)$ получим численным обращением.

Далее оба снимка разворачиваются на 90 градусов для совмещения эпиполярных линий со строками стереопары. Наконец, одно из полученных изображений $I_1^*(m, n)$ записывается в канал красного анаглифического стереоизображения, а второе $I_2^*(m, n)$ – одновременно в каналы зеленого и синего. На рис. 1. представлен пример сформированного на основе видеоданных от первого и третьего ОЭП КА «Ресурс-ДК» анаглифического стереоизображения на район города Шанхай, которое позволяет выполнять объемное дешифрирование наблюдаемых объектов. Относительную точность σ_h определения высоты в данном случае можно оценить с использованием известного соотношения

$$\sigma_h = \frac{\sigma_d}{B/H},$$

где σ_d – точность определения диспарантности, B/H – отношение базы стереосъемки к высоте. Учитывая, что $B/H \approx 0.042$ для крайних ОЭП и принимая точность идентификации координат одноименных точек в 1 пиксель, получим для снимков с пространственным разрешением 1 м $\sigma_h \approx 23.6$ м.

Идентификация одноименных точек

Для восстановления информации о трехмерной структуре сцены по стереопаре необходимо определить на изображениях координаты одноименных точек. В результате выполнения рассмотренного алгоритма формирования стереопары объекты местности, лежащие на нулевой высоте, будут полностью совмещены. Разница координат одноименных точек в строчном направлении – диспарантность d_m – будет пропорциональна высоте h соответствующей точки.

Рассматриваемая задача обработки спектрально-наличных изображений на данном этапе имеет ряд особенностей: во-первых, изображения подстилающей поверхности в разных спектральных диапазонах могут существенно отличаться, что требует использования соответствующих мер оценки их сходства [3].



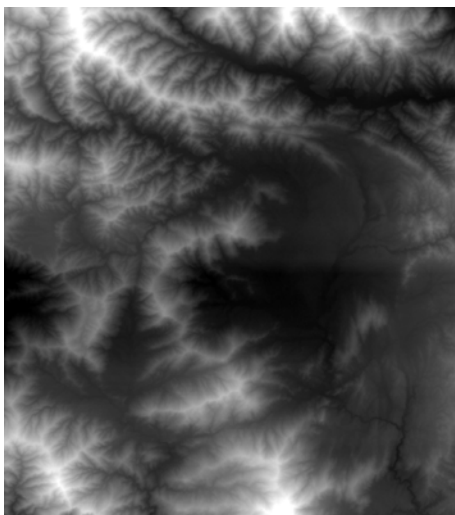
Рис. 1. Анаглифическое стереоизображение, полученное на основе данных от первого и третьего ОЭП КА «Ресурс-ДК» (для просмотра необходимы анаглифические очки)

Заметим, однако, что это не относится к случаю, когда объектом исследования являются облачные образования, которые представляются на изображениях видимой части спектра одинаково, так как не имеют цветовой окраски.

Во-вторых, поскольку регистрация изображений в разных каналах выполняется с временной задержкой друг относительно друга, то для движущихся объектов происходит смещение координат одноименных точек не только в строчном, но и в кадровом направлении на стереопаре. При этом величина смещения d_n представляет интерес для определения скорости v_n движения объектов поперек трассы полета КА, например, облачных образований – с целью их более качественной сегментации, а также для гидрометеорологических иссле-

дований. Поэтому на данном этапе сформируем две карты диспарантности $D_m(m,n)$, $D_n(m,n)$, задающие смещения координат одноименных точек в строчном и кадровом направлениях соответственно для всех пикселей базового изображения $I_1^*(m,n)$ стереопары, с помощью алгоритма оптимизационного поиска [4].

На рис. 2, а представлена карта диспарантности $D_m(m,n)$ на горный район Пакистана, сформированная на основе изображений от первого и третьего ОЭП КА «Ресурс-ДК». Код яркости пикселя равен разности координат одноименных точек в строчном направлении. Перепад высот объектов для данного района составляет порядка 2300 м. Пример 3D визуализации с наложением текстуры изображения от первого ОЭП (базового изображения) приведен на рис. 2, б.



а)



б)

Рис. 2. Пример результатов стереообработки видеоданных КА «Ресурс-ДК»: а) карта диспарантности, б) 3D снимок местности

Определение высот и скоростей объектов

На данном этапе для каждой идентифицированной одноименной точки $I_1^*(m, n)$, $I_2^*(m + D_m(m, n), n + D_n(m, n))$ вычислим геодезические координаты (φ, λ, h) соответствующих объектов, а также скорость их движения v_n поперек трассы полета КА. Заметим, что скорость v_m вдоль трассы полета КА определить по стереоизображению не представляется возможным, кроме того такое перемещение объектов будет приводить к ошибкам определения их высоты h , пропорциональным значению v_m и составляющим порядка 110 м на каждый 1 м/с скорости.

Вначале получим координаты одноименных точек на исходных изображениях $I_1(m_1, n_1)$, $I_2(m_2, n_2)$, для которых определим затем пространственное $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ и угловое $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ положение съемочных устройств в гринвичской геоцентрической системе координат. Тогда вектор искоемых координат $\mathbf{g}(X, Y, Z)$ определим как среднюю точку кратчайшего отрезка $\mathbf{g}_1\mathbf{g}_2$, соединяющего визирные лучи, а скорость v_n по длине l этого отрезка,

$$\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|}, \quad \mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1,$$

$$\mathbf{g}_1 = \mathbf{r}_1[(\mathbf{p}_0 \times \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{p}_1, \quad \mathbf{g}_2 = \mathbf{r}_2[(\mathbf{p}_0 \times \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{p}_2,$$

$$\mathbf{g} = (\mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2)/2, \quad l = |\mathbf{g}_2 - \mathbf{g}_1|, \quad v_n = l/\Delta t, \quad \Delta t = |m_2 - m_1|/f.$$

Наконец, перейдем от прямоугольных координат (X, Y, Z) к географическим (φ, λ, h) . В результате обработки всех идентифицированных одноименных точек получим массивы значений высот $h(\varphi, \lambda)$ и скоростей $v_n(\varphi, \lambda)$ наблюдаемых объектов.

Формирование выходных информационных продуктов

На заключительном этапе в зависимости от решаемых задач и параметров съемочного устройства возможно формирование ряда информационных продуктов. Во-первых, на основе рассчитанных значений высот $h(\varphi, \lambda)$ формируется цифровая модель рельефа (ЦМР) в широтно-долготной сетке с заданным разрешением. Во-вторых, выполняется сегментация облачных образований для получения одной из оценок качества информации дистанционного зондирования Земли, определяемой на этапе каталогизации, – доли облачности и ее распределения по полю снимка. Решение о принадлежности заданного пикселя $I_1(m_1, n_1)$ изображения к облачности, представленной множеством O , принимается на основе полученных геодезических координат (φ, λ, h) и скорости v_n с помощью порогового алгоритма:

$$I_1(m_1, n_1) \in O : |v_n| > \varepsilon_v \vee |h - h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda)| > \varepsilon_h,$$

где ε_v , ε_h – пороговые значения скорости и разницы высоты; $h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda)$ – истинная высота объектов земной поверхности, определяемая по ЦМР, в качестве которой используется доступная на всю территорию земной поверхности модель SRTM30.

Заметим, что алгоритмы сегментации облачных образований, основанные на анализе видеоданных в разных спектральных диапазонах, часто дают сбои в условиях съемки поверхности льда, заснеженных территорий. Рассматриваемая технология стереообработки предоставляет новый геометрический критерий сегмен-

тации, дополняя существующие алгоритмы, что позволяет повысить качество решения данной задачи.

Наконец, для гидрометеорологических исследований формируется карта параметров облачности. Для этого вначале на полутоновом изображении $I_1(m_1, n_1)$ выделим облачность определенным оттенком цвета в соответствии с полученной ранее сегментацией и значением высоты h . Для этого используем цветовое пространство HSL:

$$H = \frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}}, \quad S = \text{const}, \quad L = I_1(m_1, n_1).$$

После чего перейдем к соответствующим значениям RGB. Полученное таким образом цветное изображение $\hat{I}_1(m_1, n_1)$ трансформируем в выбранную картографическую проекцию. Далее с некоторым шагом нанесем вектора скоростей v_n . Заметим, что на соответствующем фрагменте изображения может присутствовать облачность разных слоев, движущихся в разных направлениях и скоростью, либо представлены участки суши. Поэтому для определения наиболее вероятной скорости движения анализируется гистограмма соответствующих значений, которая имеет, как правило, двухмодальную форму.

На рис. 3 представлен пример карты параметров облачности, сформированной по изображениям с пространственным разрешением 60 м от съемочного устройства МСУ-100 № 1, входящего в состав КМСС КА «Метеор-М». Отношение стереобазы к высоте составляет $B/H = 0.34$, получена оценка абсолютной точности расчета высоты – $\sigma_h = 253$ м без учета движения объектов вдоль трассы полета спутника, точность определения скорости движения в поперечном направлении – $\sigma_v = 2.3$ м/с. Изображение сформировано в картографической проекции Меркатора, облачность выделена цветом в соответствии с цветовой легендой, представленной в нижней части карты. Длина каждого вектора показывает скорость движения v_n в соответствии с масштабным отрезком в нижней правой части изображения.

Заключение

Рассмотренные алгоритмы и информационная технология стереофотограмметрической обработки спектрозональных изображений от видеодатчиков с пространственным разделением потока лучистой энергии позволяет решать ряд задач, связанных с восстановлением информации о трехмерной структуре сцены. Апробация технологии выполнена по реальным данным от современных съемочных устройств высокого и среднего пространственного разрешения. Полученные оценки точностных характеристик показали практическую применимость формируемых информационных продуктов. Разработанный на базе информационной технологии программный комплекс внедрен в научно-исследовательском центре «Планета», где по данным КМСС в оперативном режиме формируется новый вид продуктов – карты параметров облачности: маска, высота и скорость движения.

Работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2015 годы (госконтракт № П2422).

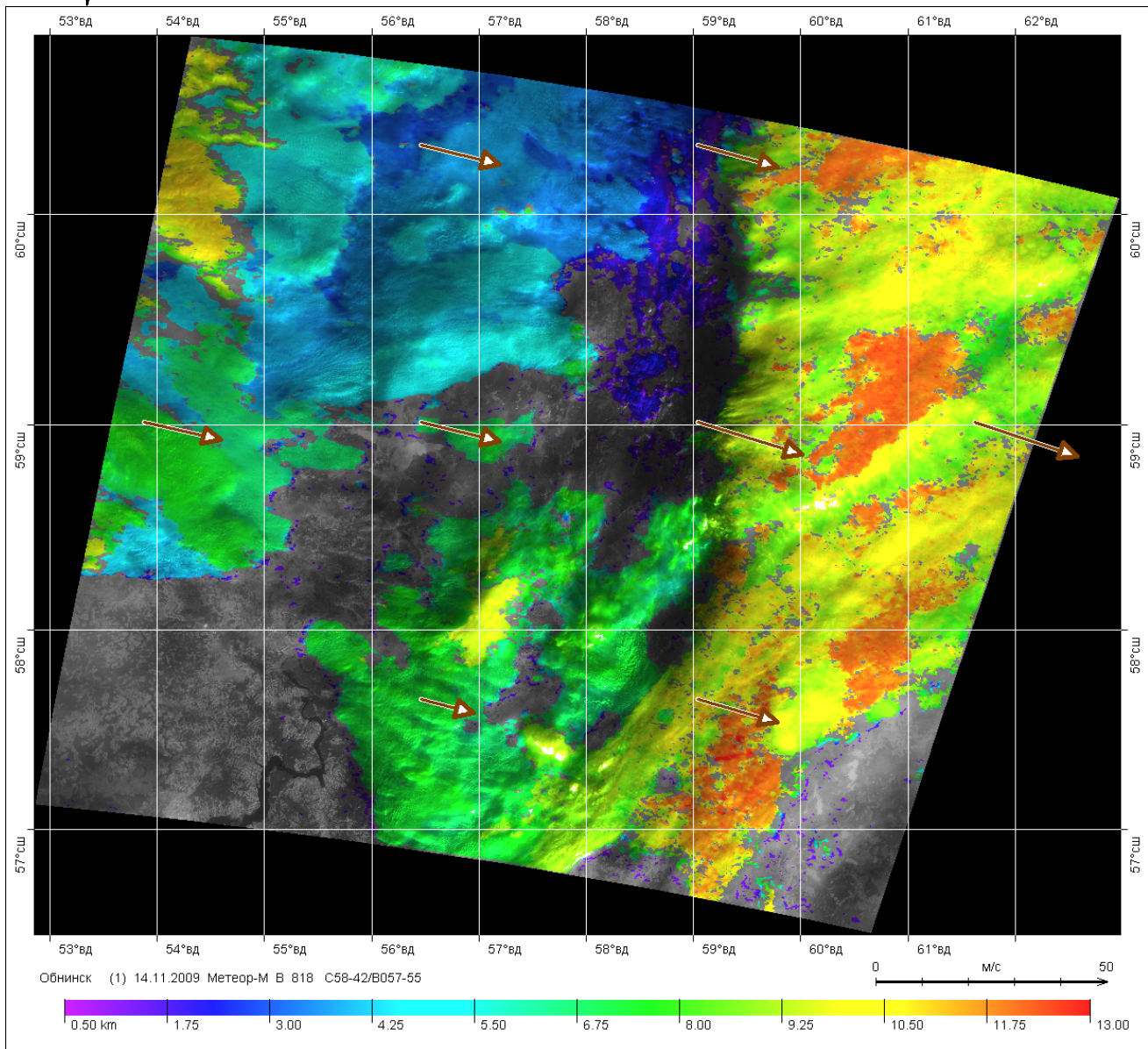


Рис. 3. Карта параметров облачности, сформированная по данным КМСС КА «Метеор-М»

Литература

1. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Формирование цветных снимков по спутниковым изображениям среднего и высокого пространственного разрешения // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 36–40.
2. Seber G.A.F., Wild C.J. Nonlinear Regression. New York: John Wiley and Sons. 1989.
3. Hirschmüller H., Scharstein D. Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2009. №31(9). С. 1582-1599.
4. Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Идентификация одноименных точек на стереоснимках с использованием алгоритмов оптимизационного поиска // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГПУ. 2008. С. 83-90.

INFORMATIONAL TECHNOLOGY OF MULTILINE SCANNER VEODATA STEREOGRAPHOMETRIC PROCESSING

Kuznetsov A.E., Poshehonov V.I.

The solution of new tasks of stereophotogrammetric processing of multispectral images from multiline scanners with spatial separation of radiation energy is considered. Characteristic features of developed informational technology as well as processing results based on real data are presented.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПУСКОВ ИЗДЕЛИЙ РКТ

Товнеко А.В., главный специалист, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4370@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: графический анализ, машинная графика, телеметрия, графическое представление, архитектура системы, разработка программного обеспечения.

Разработка архитектуры программного обеспечения визуализации

Рассмотрим программное обеспечение (ПО) как продукт трёх ключевых участников его жизненного цикла. Заказчик – постановщик задачи с основополагающими условиями по технико-экономическим показателям. Пользователь – эксплуатирующая организация с более детальными требованиями, обусловленными имеющимися знаниями предметной области и опытом работ с подобными программными средствами. Разработчик – группа программистов, ориентируемая условиями Заказчика и ожиданиями Пользователя, но реализующая собственную стратегию. Стратегия разработчика обусловлена:

- Простотой функционального наращивания на стадии сопровождения. Целью является обеспечение возможности ввода новых функций включением в состав системы новых модулей без перекомпиляции предыдущего задела (или с минимальной его доработкой) [3].

- Экономической эффективностью разработки и простотой доработки по итогам эксплуатации. В основе лежит выбор независимых направлений работ, которые могут проводиться одновременно.

- Возможностью использования модулей в смежных проектах. Проблема адаптации и заимствования включает задачу создания кроссплатформенных приложений.

Ключом к обеспечению данной стратегии должна являться **унификация решений**. Унификация может не обеспечивать полную неизменность кода при компиляции на другой платформе, однако её высокий уровень способствует минимизации затрат на модернизацию, адаптацию, заимствование [4]. Рис. 1 иллюстрирует общие и специальные факторы выбора архитектуры. Требования сверху – «организационные», классифицированы по участникам проекта, которыми они выданы. Условия снизу – «технические», продиктованы той ролью в автоматизированном комплексе лётных испытаний РКТ (ракетно-космической техники), которую занимает подсистема графического анализа в головном комплексе полигонных испытаний.

Рассмотрим специфику систем графического анализа измерительной информации (ИИ) РКТ. Конечным результатом работы для пользователя системы должны

В статье представлены принципы организации вычислительного процесса систем графического представления измерительной информации (ИИ), даны обоснование и выводы по эффективному планированию разработки. Рассматриваются вопросы обеспечения информационного обмена и системной интеграции средств визуализации, обработки, сбора и диагностирования. Проведена классификация систем и обрабатываемых данных с точки зрения системного архитектора. Представлены примеры форм визуализации.

стать заключения о соответствии лётно-технических характеристик (ЛТХ) ожидаемым. Знание-порождающая (когнитивная) визуализация в данном случае включает следующие графические элементы:

- графики, гистограммы, осциллограммы и таблицы – изображения численных характеристик, качественный вид физических процессов как результат индивидуальной обработки измеряемых параметров;



Рис.1. Факторы выбора архитектуры системы как результат компромисса трёх участников жизненного цикла программного обеспечения

- циклограммы команд и событий – табличное представление с заключениями вида «норма/ненорма» – в общем случае как результат обработки нескольких параметров;

- модели и мнемосхемы (в том числе 3D-модели) – составной результат обработки многих групп парамет-

ров с элементами допускового контроля и контроля времени срабатывания. Наличие моделей и мнемонических условных схем процессов, происходящих на объекте испытаний, свидетельствует о переходе на новый качественный уровень – от отображения измерений к диагностированию отработки агрегатов и узлов.

Задача сбора и визуализации ИИ осложняется применением нескольких типов источников информации – разнородных как по структуре блоков измерений, так и по методикам их обработки. Разнородность источников обусловлена:

- типами приёмно-регистрирующих станций;
- типами бортовых радиотелеметрических систем (БРТС);
- типами датчиков (измерительных устройств) – разные методы преобразования в единицы физических величин предполагают не только несколько видов тарировочных характеристик, но и отличия во входных технологических заданиях;
- характером входной информации – функциональной, сигнальной, траекторной и т.д.

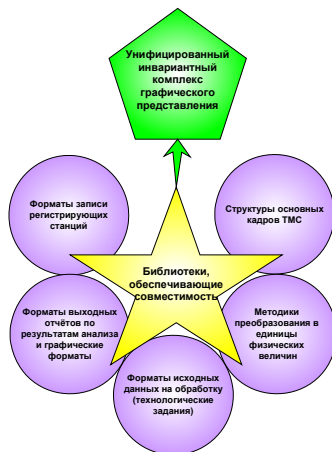


Рис.2. Обеспечение независимости от входных форматов

Таким образом, фундаментальным звеном в выборе архитектуры ПО становится обеспечение независимости (инвариантности) комплекса графического представления от входных форматов, т.е. формирование унифицированных информационных сечений с помощью внешних библиотек функций, в которых сосредоточена

зависимость от тех или иных структур (рис. 2). Сам комплекс анализа ИИ также должен иметь модульную структуру для обеспечения нескольких видов представления.

Режим реального времени (РВ) или режим «Репортаж» (термин, принятый в сфере обеспечения пусков ракетной техники) подразумевает выполнение последовательности приёма, регистрации, передачи в центр, оценки качества, выбора, обработки, представления и документирования одного блока информации до прихода очередного блока. То есть время реакции системы сбора и анализа менее цикла БРТС предоставляет возможность выводить результат без накопления временных задержек и оперативно вмешиваться в процесс испытания при нештатных или аварийных ситуациях. Если в послеполётном анализе важны полнота и достоверность информации, то ключевым требованием в РВ является своевременная надёжная выдача результата. Сложная техническая основа режима РВ делает его наиболее трудоёмким для разработчика и требующим максимальных ресурсов от применяемых вычислительных средств. Из этого следует, что системы графического анализа в РВ должны иметь многофункциональные диагностические средства для оценки готовности. Средства диагностирования системы сбора-анализа и смежные с ними средства централизованного управления образуют единую взаимосвязанную систему, в которой интерфейсы контроля и мониторинга состояния чередуются с интерфейсами обмена ИИ (рис. 3).

Итак, разработка архитектуры программного обеспечения базируется:

- на подготовке перечня составных частей, определении информационных и управляющих связей между ними, на реализации способов организации вычислительного процесса (в том числе способов информационного обмена, эффективных по времени реакции системы);
- на соблюдении множества ограничений, продиктованных в первую очередь условиями заказчика и пользователя, и во вторую очередь – стратегией разработчика.

Также, важной составляющей архитектуры ПО являются процессы планирования и разработки, которые непосредственно определяют экономический эффект – как текущий, так и перспективный – с учётом совместимости составных частей нескольких систем, возможности последующего внедрения, развития и т.д.

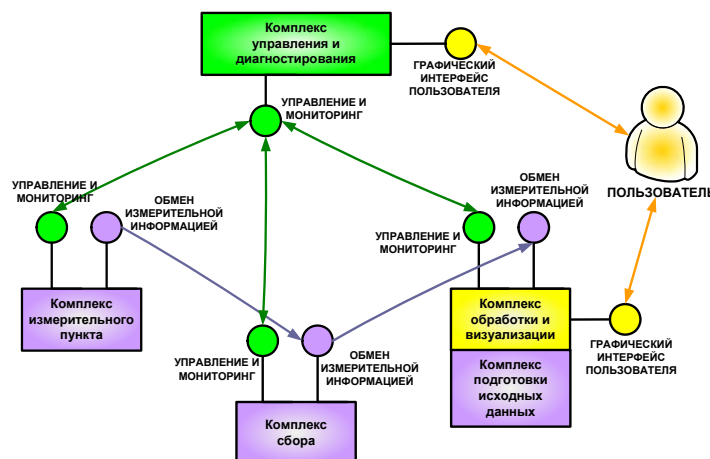


Рис.3. Интерфейсы ключевых подсистем и роль модуля централизованного управления и диагностирования

Итеративная разработка системы графического анализа ИИ

Несмотря на множество методологий разработки ПО, на практике при проектировании систем графического отображения в основном используется итеративная модель разработки с циклическим анализом рисков и корректировкой исходных требований к ПО. Это обусловлено:

- требованиями ГОСТ;
- динамичным изменением исходных данных на разработку – ввод в эксплуатацию новых изделий РКТ, необходимость обмена со смежными комплексами анализа и т.д.;
- субъективностью требований к объёму и свойствам графического анализа. Если методики обработки известны и строго заданы документацией на изделие РКТ, то методики визуализации нестандартны и выбираются специалистами по анализу ЛТХ индивидуально. Таким образом, требования, выявленные на стадии информационного обследования (рекогносцировки), могут быть скорректированы к моменту поставки первого опытного образца системы в связи с новыми предпочтениями специалистов.

Итеративная разработка ПО в общем виде – это цикл действий по разработке системных требований, программированию, автономному тестированию, системной интеграции и комплексному тестированию (рис. 4) [1, 2]. После каждого комплексного теста с участием заказчика и пользователя производится анализ результатов и, при необходимости, дополнение требований и

доработка продукта. Каждый элемент схемы также может пройти несколько итераций [2].

Необходимо обратить внимание, что обеспечение одновременной разработки по нескольким направлениям и независимость автономных тестов позволяют сократить сроки. Если при постановке задачи состав и взаимосвязи компонентов программного комплекса выбраны корректно, то при соблюдении общих системных соглашений разработчики работают максимально эффективно и независимо друг от друга – до стадии системной интеграции и комплексного теста, когда предмет отладки будет являться вся система. Отсюда следует вывод, что задачи архитектора системы графического анализа включают:

- поиск зависимости результатов от входных данных – для последующего выявления независимых друг от друга направлений работ (типы БРТС, типы визуальных моделей, методы математической обработки и т.д.);
- повторное исследование с целью поиска общих компонентов по нескольким направлениям – диагностика, моделирование, отображение измерений и т.д.

Результатом такого анализа должен являться план разработки составных частей с детальными техническими требованиями (рис. 5), которые следуют из:

- декомпозиции алгоритмов (программирование процедурное);
- декомпозиции классов (программирование объектно-ориентированное) [1, 5];
- декомпозиции модулей (конструктивное деление).

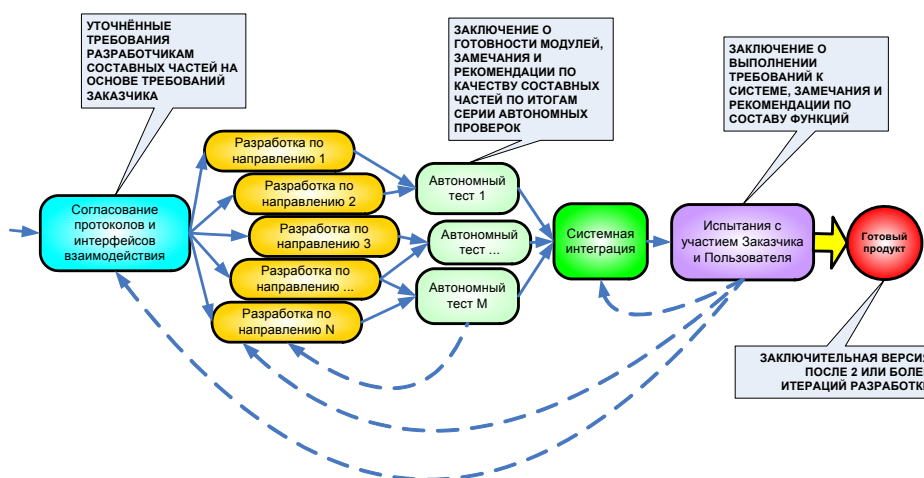


Рис. 4. Общий вид последовательности итеративной разработки

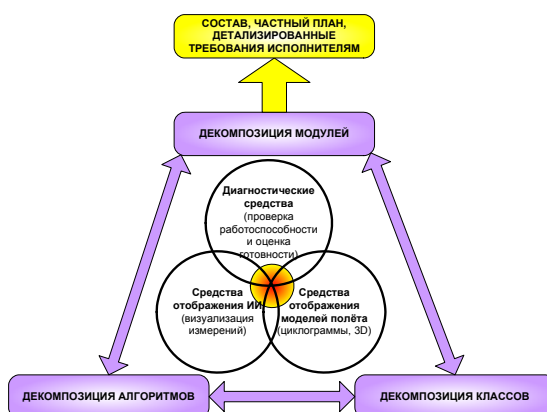


Рис. 5. Декомпозиция модулей определяет состав и частные задания

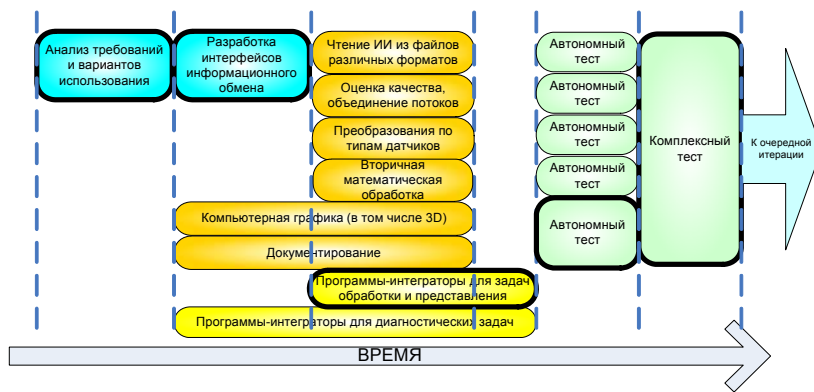


Рис. 6. Итерация разработки ПО системы графического анализа

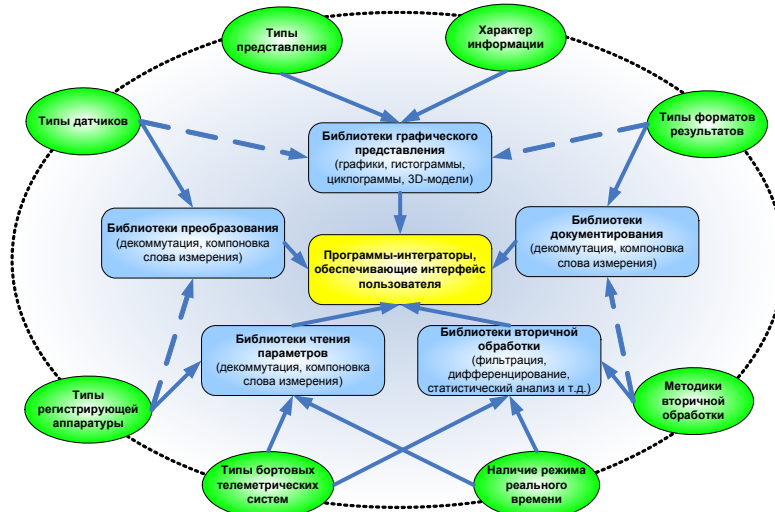


Рис. 7. Обоснование возможности распараллеливания разработки

Итерация разработки применительно к нашей предметной области показана на рис (рис.6), узлы критического маршрута выделены жирной линией. Среди автономных направлений работ – модули графики, документирования, вторичной обработки, тарирования, оценки достоверности и чтения из различных форматов.

Классификация систем графического анализа ИИ, модульная структура и независимость составных частей

Принципиальную возможность выбора независимых направлений работ согласно диаграмме (рис.6) иллюстрирует схема (рис.7) [3, 4]. Эллипсами представлены технические требования и ограничения, прямоугольниками – модули ПО, в которых сосредоточена зависимость от тех или иных требований/ограничений.

Классификация систем по нескольким критериям является ключом к выбору корректной логической структуры приложения и к сведению правил разработки в общую методологию. Состав модульной структуры определяется следующими условиями:

- различиями функционального и эксплуатационного назначения составных частей и, как следствие, возможностью выделения общей части (в объектах развертывания, в классах, в алгоритмах, в математических методах);
- различиями в форматах данных, циркулирующих в системе – может ли информация различного назначения

быть представлена общими структурами данных или передана общими прикладными протоколами;

- топологией и характеристикой каналов связи между составными частями.

Последнее условие действует не всегда, так как каналы связи могут быть доработаны под требования к системе, однако на практике типовой является ситуация, когда разрабатывается только ПО, которое должно эксплуатироваться в комплексе, инфраструктура которого доработке не подлежит (т.е. такие характеристики, как вычислительная мощность, дисковая память, скорость передачи данных – являются исходными ограничениями для программиста).

Чтобы выявить указанные условия применительно к системам графического анализа ИИ РКТ, необходимо провести классификацию компонентов по следующим критериям [3, 4]:

- по видам отображаемой информации;
- по типу визуализации;
- по режиму работы относительно времени сеанса сбора;
- по эксплуатационному назначению;
- по распределению задач между составными частями.

Критерии классификации и определяемые ими свойства системы представлены на рисунке (рис.8). Также существует косвенная зависимость между категориями по нескольким критериям, которая далее будет представлена в виде матрицы зависимости.



Рис. 8. Критерии классификации и определяемые ими свойства компонентов

Классификация по виду отображаемой информации указывает на состав фундаментальных компонентов графического представления и на алгоритмы графического вывода. Измерительные данные при информационно-телеметрическом и навигационном сопровождении пусков подразделяются на следующие виды:

- **функциональная информация** – параметры, значения которых изменяются во времени в известном диапазоне шкалы (кодов или единиц физических величин). Функциональные телеметрические параметры являются измерениями давления, температуры, ускорения и т.д.;

- **сигнальная («контактная») информация** – параметры, принимающие значения вида «замкнут»/«разомкнут»;

- **траекторная информация** – параметры движения, определяющие привязку текущей позиции изделия к географическим координатам. Помимо функциональной составляющей, например, графиков скорости и высоты от времени, они содержат информацию, требующую специальных способов представления – географические карты, трёхмерные модели полёта и др.;

- **специальная цифровая информация** – результаты анализа бортовых цифровых вычислительных комплексов, не относящиеся к предыдущим трём категориям, например, циклограмма системы управления или диаграмма измерительных каналов ГЛОНАСС;

- **диагностическая информация по изделию** – результаты допускового контроля и контроля времени срабатывания, которые могут быть представлены индикацией на графиках параметров, либо с помощью специальных способов представления – мнемосхем или трёхмерных моделей;

- **диагностическая информация по системе сбора/визуализации** – результаты проверки работоспособности составных частей и оценки готовности системы к предстоящему сеансу сбора, собранные в единую форму представления и отображаемые в доступном для пользователя виде. К данной категории относятся мнемосхемы каналов сбора ИИ;

- **оценка достоверности измерений** – выделена из предыдущей категории в отдельную, так как характеризует не только работоспособность системы сбора и обработки, но и свойства радиоканала между изделием и антенными системами измерительных пунктов. Достоверность ИИ – группа функциональных параметров или одна интегральная характеристика, показывающая ка-

чество собранных измерений. Как правило, для режима РВ параметр достоверности рассчитывается по опорной синхроинформации (маркерам) как процент совпадений от ожидаемого количества маркеров за цикл работы телеметрической системы;

- **видеоинформация** – в общем случае может быть использована не только для вывода пользователю системы, но и для коррекции параметров движения, полученных по телеметрическим каналам.

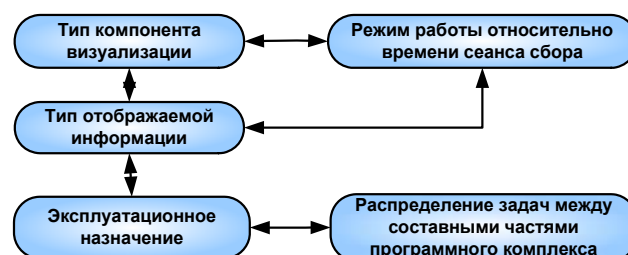


Рис. 9. Условные зависимости критериев классификации, раскрываемые матрицами соответствия

Различные требования приводят к необходимости разработки нескольких компонент для представления той или иной категории информации, а общие требования предоставляют возможность применить единый компонент к нескольким категориям. Следующий критерий классификации – тип визуального компонента или способ представления. Возможны следующие группы:

- **графики во временной шкале** – либо типовые графики функции времени $y=f(t)$, либо признак срабатывания сигнального параметра. Графики могут быть «скользящие» на интервале заданной длительности со сдвигом шкалы по мере приёма данных и «статичные», заполняющиеся в фиксированном интервале;

- **таблицы** – как таблицы вида «время-параметр-достоверность», так и таблица текущих (последних зарегистрированных) параметров для режима реального времени;

- **циклограммы** – с заключением вида «норма/ненорма» и условными знаками признаков событий (например, выявлено ли событие по косвенным признакам, не является ли аварийным и т.д.);

- **диаграммы – гистограммы и осциллограммы** – как правило, в кодовой или относительной шкале. В современной практике широкого распространения не получили. Гистограммы и осциллограммы имитируют экран приёмно-регистрирующей аппаратуры, показывающей

выход каналов основного коммутатора ТМС или функциональные параметры локального коммутатора, используются преимущественно для диагностики системы;

- **транспаранты срабатывания** – условные знаки выхода сигнального параметра или результата допускового контроля – могут быть как показывающими текущее состояние измерительного канала, так и результатом статистического анализа и признаком достоверного срабатывания датчика (после фильтрации шума);

- **битовые графические образы** – отображение битовой структуры измерительного канала. На практике используется для совместного анализа нескольких контактных датчиков, поступающих в одном телеметрическом слове;

- **мнемосхемы и модели** – широкая категория специальных элементов представления. Могут быть универсальными, формируемыми системным интегратором по принципу SCADA-системы, либо ориентированными на конкретную систему или конкретный объект измере-

ний. В современной практике – это анимированные двумерные и трёхмерные модели – по системе сбора и по изделию с отображением работы двигательных установок и отделения элементов конструкции;

- **географические карты**;

- **воспроизведение видео**.

Сопоставим категории типов информации и категории компонентов (способов представления). Модель применимости компонентов представим в виде матрицы. Условные обозначения следующие:

- знак **(+)** – совместимость компонента с видом информации;

- знак **(0)** – условная совместимость (применять возможно, но нецелесообразно);

- знак **(*)** – компонент индивидуален и не может быть заимствован для информации другого типа;

- знак **(?)** – вопрос о применении компонента должен быть рассмотрен индивидуально;

- знак **(-)** – применение компонента невозможно.

Таблица 1

Матрица совместимости способов отображения с видами информации

	Функциональная	Сигнальная	Траекторная	Специальная цифровая	Диагностическая по изделию	Диагностическая по сбору	Оценка достоверности ИИ	Видео
Графики	(+)	(+)	(+)	(?)	(?)	(?)	(+)	(-)
Таблицы	(+)	(+)	(+)	(?)	(?)	(+)	(+)	(-)
Циклограммы	(-)	(-)	(?)	(+)	(+)	(?)	(-)	(-)
Гистограммы и осциллограммы	(+)	(0)	(0)	(+)	(?)	(?)	(0)	(-)
Транспаранты срабатывания	(0)	(+)	(-)	(?)	(?)	(?)	(?)	(-)
Битовые графические образы	(?)	(+)	(0)	(*)	(0)	(-)	(?)	(-)
Мнемосхемы и модели	(-)	(-)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(-)
Географические карты	(-)	(-)	(+)	(?)	(-)	(-)	(?)	(-)
Воспроизведение видео	(-)	(-)	(-)	(-)	(?)	(?)	(-)	(+)



Рис. 10. Отличительные свойства режима реального времени

Классификация по режиму работы относительно времени сеанса сбора определяет наличие задач реального времени:

- режим «Репортаж», для которого главным условием является быстроедействие и своевременность выдачи информации (т.е. допускается определённый уровень потерь для достижения заданного уровня эффективности по времени реакции);

- представление после сеанса – режимы экспресс-анализа, оперативной и полной обработки, отличающиеся друг от друга требованиями к объёму и качеству результатов. При этом все режимы послеполётной обработки требуют общего принципа организации вычислительного процесса – ключевым требованием является полнота информации, недопустимость потерь.

Противоречивые требования – реальное время против полноты и надёжности представления информации [3] – определяют следующие составляющие архитектуры системы (рис.10):

- протоколы информационного обмена – для реального времени используются протоколы без обратных связей. Как правило, на транспортном уровне модели OSI используется протокол UDP без подтверждений вместо гарантирующего доставку TCP;

- алгоритмы математической обработки (в частности, для реального времени можно тарифировать все возможные значения кода параметра);

- содержание пользовательского интерфейса – эргономика и техническая эстетика экранных форм, которые должны обеспечивать полноценное восприятие пользователем больших объёмов информации для анализа.

Метрики качества ПО

Вопрос о показателях качества ПО вызывает споры в среде специалистов по программированию, так как формальные метрики не в полной мере учитывают творческий характер работ и, как следствие, не объективно отражают фактическую сложность. Так или иначе, вопрос о численных метриках неизбежно возникает при обосновании выбора архитектуры ПО – когда необходимо выполнить сравнительный анализ нескольких вариантов и иметь критерий, формализованный математически. Могут применяться несколько подходов – каждый в отдельности или их комбинации:

- ГОСТ системы менеджмента качества (ISO 9001 и др.) – общие определения качества;

- специализированный ГОСТ информационной технологии (ISO 9126 «Оценка программного продукта. Характеристики качества и руководство по их применению») – функциональность, надёжность, применимость, эффективность, сопровождаемость и мобильность, выраженные набором прямо или косвенно измеряемых характеристик;

- узкоспециализированные методы – например, оценка возможности покрытия маршрутов тестированием и др.

Итоговый результат является взвешенной суммой N выбранных метрик качества q_i , где весовые коэффициенты A_i определяют важность критерия для системного архитектора:

$$Q_{VAR} = \sum_{i=1}^N A_i q_i.$$

При наличии M вариантов выбирается соответствующий наибольшему значению:

$$Q_{VAR}^* = \max[Q_{VAR}^{(1)}, Q_{VAR}^{(2)} \dots Q_{VAR}^{(M)}].$$

Применительно к системам РВ – в оценках важности численных метрик, которые субъективны и выбираются проектировщиком, необходимо учитывать следующее:

- эффективность по быстрдействию важнее эффективности по использованию вычислительных ресурсов (более того, экономия вычислительных ресурсов может быть исключена из суммарного критерия);

- адаптируемость важна не менее, чем корректность и пригодность для применения – как адаптируемость к новым входным структурам, так и адаптируемость к новым каналам связи, например, потенциальная возможность отработать по каналам связи с меньшими скоростями передачи данных;

- все критерии надёжности должны быть важнее аналогичных в системах послесеансного обслуживания – особенно «устойчивость» к ошибкам во входных данных по измерительным и по управляющим интерфейсам.

Специфика систем графического анализа ИИ в РВ обязывает учитывать **дополнительные метрики**, которые дополняют общие требования:

- пропускная способность в широком смысле:

- количество отображаемых графиков, транспарантов срабатывания;

- количество выводимых на экран точек измерений;

- количество формуляров отображения на экране;

- скорость приёма измерений;

- количество потоков входной ИИ;

- количество поддерживаемых экранов коллективного пользования;

- временные характеристики:

- время формирования буфера кадра – количество кадров в секунду при заданном количестве накопленных измерений – как для графиков и 3D-моделей, так и для видео;

- задержка по времени от момента регистрации на измерительном пункте до вывода на экране потребителя первого блока данных (необходимо заметить, что последующие блоки должны обрабатываться в течение цикла БРТС, чтобы сохранить режим РВ);

- период обновления экрана, время реакции экранных форм по действию пользователя.

Организация вычислительного процесса и распределение компонент по автоматизированным рабочим местам

Рассмотрим предложенный вариант классификации системы и её разбиения на компоненты с точки зрения объектов развёртывания. Схема (рис.11) показывает, что в системе сбора-анализа выделяются три уровня по степени обработки информации:

- уровень измерительного пункта, на котором выполняются задачи приёма, регистрации и формирования выборки параметров для передачи в центр;

- уровень центра сбора, обеспечивающего приём и выбор наиболее качественного (достоверного) потока для выдачи потребителю;

- уровень анализа и документирования, в котором при наличии специальных методов первичной обработки можно выделить самостоятельный подуровень между центром сбора и конечным потребителем.

Тонкими стрелками изображены пути передачи через файлы и/или сетевые пакеты, широкими стрелками – передача массивов информации при вызове динамических библиотек.

В зависимости от того, является ли система географически распределённой, от количества её пользователей, от распределения обязанностей между подразделениями эксплуатирующей организации – уровни обработки могут быть реализованы на одном или нескольких автоматизированных рабочих местах (АРМ):

- в виде единого АРМ регистрации-анализа – на практике востребовано при заводских испытаниях РКТ и

при наземной подготовке на стартовом комплексе;

- в виде распределённой системы с небольшим числом АРМ анализаторов – когда задачи обработки и визуализации реализованы в одной ПЭВМ;

- в виде сложной распределённой системы с несколькими АРМ обработчиков и несколькими АРМ потребителей. Возможно и более детальное распределение по нескольким АРМ при критических требованиях к надёжности выдачи результата.

Отличительным свойством нашего решения является независимость состава ПО от распределения по рабочим станциям. Декомпозиция на модули и комплексы чтения, преобразования, математической обработки, документирования, отображения обеспечивает готовность к любому варианту развёртывания.

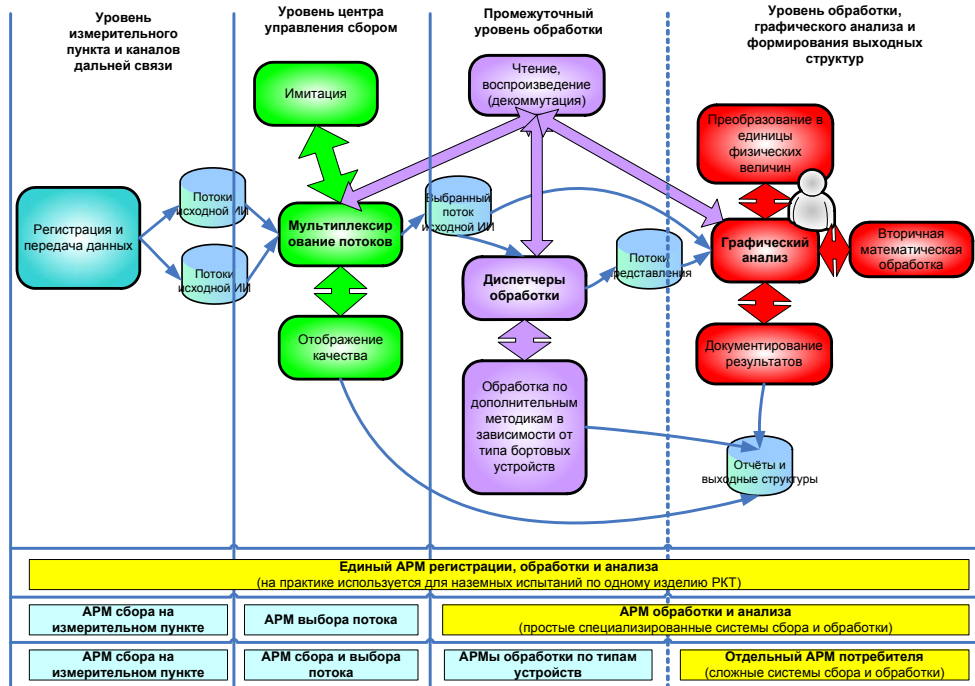


Рис. 11. Варианты распределения модулей по АРМ системы сбора и анализа

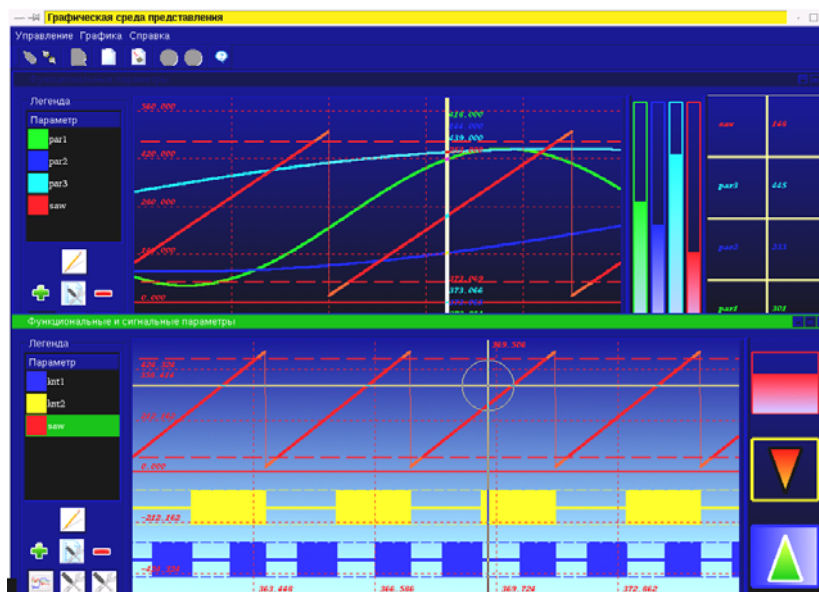


Рис. 12. Формуляры отображения функциональной и сигнальной информации с допусковым контролем и контролем времени срабатывания – первичная обработка в РВ

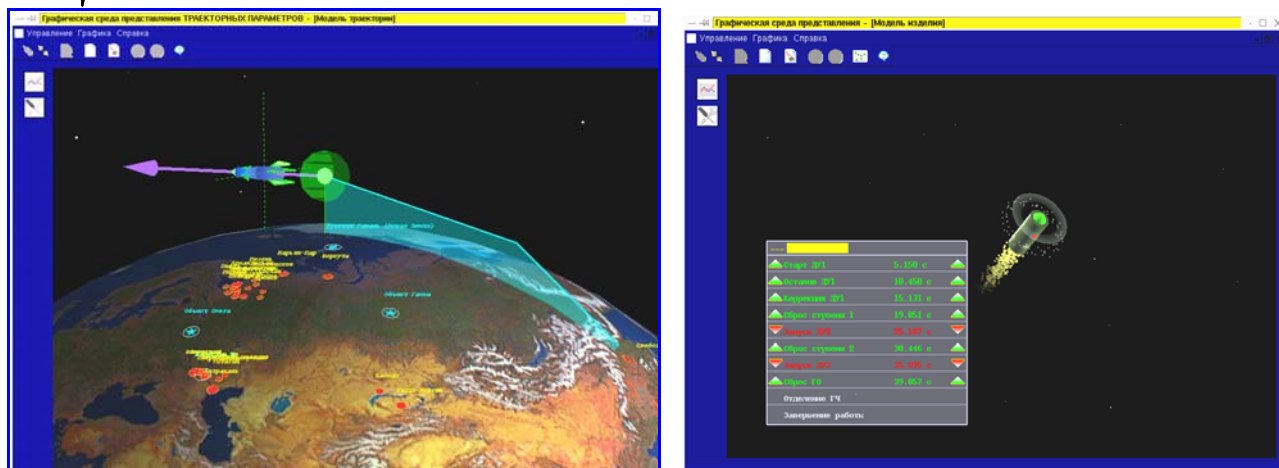


Рис. 13. Трёхмерные модели полёта и циклограммы – вторичная математическая обработка в РВ

Апробация и результаты внедрения. Заключение

Приведённые в настоящей статье решения применяются в ряде систем, созданных по заказам Министерства обороны РФ. Экономический эффект подтверждён на этапах создания и авторского надзора систем информационно-телеметрического и навигационного обеспечения пусков.

Примеры экранных форм программного комплекса визуализации в РВ, имеющего модульную структуру, представлены далее на иллюстрациях рис. 12 и 13 (графики, циклограммы и траектории условные – от программного имитатора по математической модели) [3].

Исследование на поиск оптимальной архитектуры ПО продолжается – в перспективе будет осуществлён переход от наборов специализированных программ к пользовательской среде редактирования методов обработки на основе «вычислительного ядра», где реализуется участие анализатора ЛТХ в составлении сценариев обработки и визуализации.

Литература

1. И.Соммервилл «Инженерия программного обеспечения» (Изд.дом «Вильямс», г.Москва, 2002г.);
2. Ф.Кратчен «Введение в Rational Unified Process» (Изд.дом «Вильямс», г.Москва, 2002г.);
3. А.В.Товпеко «Графический анализ ТМИ – современные требования и пути развития» 2 – тезисы к стендовому докладу на научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и её роль в устойчивом социально-экономическом развитии общест-

ва» (ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г.Самара, 2009г.);

4. О.Г.Светников, А.В.Товпеко «Архитектура системы графического представления измерительной информации» – тезисы к стендовому докладу на научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и её роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества» (ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г.Самара, 2009г.);
5. Дж.Рамбо, А.Якобсон, Г.Буч «UML Специальный справочник». (Изд. дом «Питер», г.Санкт-Петербург, 2002г.).

THE ARCHITECTURE OF THE REAL-TIME MEASUREMENT DATA REPRESENTATION SYSTEM FOR THE SPACE VEHICLES LAUNCHES PROVIDING

A.V.Towpeko

The principles of the calculating process organization of the graphical representation system of the measurement are described in the article. For the effective planning of the software project the foundations and results are given. The aspects of the informational exchange and system integration of the representation, gathering, diagnosis and processing equipment are considered. The classification of the systems and the data to be processed is represented from the system designer point of view. The samples of the visualization forms are included.

УДК 550.3

КОМПЛЕКС ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ОСВОЕНИЮ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА

Добычин Н.Н., первый заместитель директора филиала - заместитель главного конструктора филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - «ОКБ «Спектр», лауреат Государственной премии СССР, meandr@spectr.ryazan.ru
Стругалев О.В., начальник отдела, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», meandr@spectr.ryazan.ru
Франк Е.Б., начальник бюро, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», к.т.н., meandr@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: Мировой океан, геофизические исследования, шельф, железно – марганцевые конкреции, морская сейсморазведка, сейсмоакустика, цифровая система, комплекс, глубоководный аппарат, доплер лаг, гравиметрия, магнитометрия, навигационный комплекс.

Введение

Решение важнейшей Государственной проблемы – освоение природных ресурсов Мирового океана, прежде всего, углеводородных (нефть и газ) и твердых полезных ископаемых, непосредственно связано с внедрением технологий геофизических исследований на акватории.

В общем виде технологии геофизических исследований на акватории включают сейсмическую и сейсмоакустическую разведку, основанную на возбуждении колебаний широкого спектра и регистрации отраженных сигналов, акустическую съемку с помощью гидролокаторов различного типа, а также гравиметрическую и магнитометрическую съемку естественных полей в движении надводного судна или подводного аппарата, с обработкой полученных данных либо на борту судна, либо на береговом вычислительном центре.

На начальном этапе внедрения морской геофизики стало очевидным, что обработка получаемой информации невозможна без создания высокопроизводительных цифровых средств и методов сбора и обработки.

В СССР работы по внедрению в морскую геофизику цифровых методов были начаты в конце 60-х годов, при этом основное внимание было уделено техническому оснащению морской сейсморазведки, как наиболее информативному методу исследований, в результате был разработан комплекс современных технических средств.

Судовые системы сбора и регистрации

В конце 1969 года в рамках Государственного плана развития морских исследований по заданию Мингео СССР ОКБ "Спектр" приступило к разработке цифровой морской сейсморегистрирующей системы, обеспечивающей проведение морской сейсморазведки в непрерывном режиме при движении судна.

Созданная в 1970 году и принятая межведомственной комиссией Мингео СССР под председательством начальника Управления геофизических работ, члена коллегии Мингео

Описываются созданные в ОКБ «Спектр» в 1970 – 2000г.г. программно – технические средства для геофизических исследований в Мировом океане с целью освоения природных ресурсов на шельфе и в глубоководных районах, история их создания и достигнутые основные тактико – технические характеристики разработанных систем.

СССР Федынского В.В. цифровая сейсморазведочная система "ГРАД" для геофизических исследований с борта движущегося судна, представляла собой функционально связанные источник возбуждения упругих волн, многоканальное до 24 каналов, приемное устройство, выполненное в виде маслonaполненной шланговидной секционированной протяженной антенны с определенным образом сгруппированными пьезоприемниками, подключенное к аппаратуре оцифровки низкоуровневых 4-5 мкВ, с динамическим диапазоном 60-80 дБ в полосе частот 10-50 Гц сигналов, подсистему регистрации на базе высокоинформативного цифрового регистратора и сейсмостанцию ССЦ-1 (ССЦ-2).

Для реализации требований ТЗ на создание бортовой сейсморегистрирующей системы для морских геофизических исследований были решены следующие задачи:

- осуществлено сопряжение морской приемной системы (косы) с аналоговым входом станции ССЦ-1 (ССЦ-2), разработанной институтом ВНИИГеофизика для целей сухопутной сейсморазведки;
- разработана высокоинформативная подсистема цифровой регистрации данных в непрерывном режиме;
- обеспечена синхронизация в движении судна источника возбуждения и подсистемы преобразования и регистрации данных;
- обеспечена возможность комплексирования различных геофизических методов исследований в движении судна, в т.ч. гравиметрию и магнитометрию;
- обеспечена навигационная привязка данных.

В 1971-75 г.г. ОКБ «Спектр» изготовило 13 комплектов системы "ГРАД" и внедрило их на судах Мингео СССР и АН СССР.

С использованием системы "ГРАД" впервые в СССР с применением цифровой регистрации данных были начаты масштабные сейсморазведочные работы по исследованию на нефть и газ на шельфах Баренцева, Балтийского, Черного, Азовского и Охотского морей, в рамках международного контракта на шельфе республики Шри-Ланка, а также региональные сейсморазведочные работы в Атлантическом и Индийском океанах.



В 1971 году "Южморгео", а затем, с 1978 года его правопреемник НПО "Южморгеология", было определено Заказчиком судовых навигационно-геофизических систем для всех морских объединений и организаций Мингео СССР с задачей по разработке технических требований к новым, более совершенным модификациям.

Повышение технических требований в части числа приемных каналов, полосы регистрируемых частот, динамического диапазона и уровней принимаемых сигналов, а также расширение области применения создаваемых средств, потребовало создания более совершенных систем, поскольку примененные в системе "ГРАД" сейсмостанции ССЦ-1 (ССЦ-2) и доработанный, адаптированный к ним накопитель НМЛ67 не обеспечивали реализацию заданных требований.

При создании в 1975-95 г.г. судовых геодезических систем сбора и регистрации данных с повышенными тактико-техническими характеристиками в ОКБ "Спектр" были впервые разработаны:

- подсистема регистрации данных в цифровой форме на базе накопителей на магнитной ленте НМЛ5003, НМЛ5017 и магнито-оптических дисководов с регистрацией на магнитооптический диск;
- подсистема накопления данных большой емкости (ОЗУ) на базе интегральных запоминающих устройств;
- подсистема преобразования аналоговых сигналов низкого уровня от 1 мкВ в полосу частот входного сигнала до 4000 Гц;
- подсистема автоматического регулирования усиления, обеспечивающая регистрацию сигналов, изменяющихся по уровню в диапазоне до 100-120 дБ;
- входной усилитель с уровнем приведенного шума менее 1 мкВ.

За период с 1970 по 1995 г.г. в ОКБ "Спектр" в рамках научно-технического направления "Морское геофизическое приборостроение" было разработано 7 модификаций навигационно-геофизической системы в т.ч. ГРАД, ГРАД-АМ, ГАР96, ГАР120, ГРОТ3, ГРОТ48, ГРОТ240М.

Каждая вновь создаваемая модификация системы отличалась от предыдущей расширенными функциональными возможностями и повышенными тактико-техническими характеристиками.

Система ГРАД-АМ обеспечивала подключение 48 канальной приемной косы, предварительную обработку регистрируемых данных и, за счет установки двух цифровых накопителей НМЛ-5017, позволяла осуществлять сейсморазведочные работы в длительном непрерывном режиме.

Система ГАР была реализована на базе мини-ЭВМ, обеспечивала подключение до 192 приемных каналов и регистрацию сигналов в полосе частот до 2 кГц с динамическим диапазоном до 110 дБ. **Система ГАР** в отличие от системы ГРАД и ГРАД-АМ, включала специально разработанный для нее аналого-цифровой тракт, защищенный авторским свидетельством.

Система ГРОТ (и ее исполнения) являлась наиболее совершенной принципиально новой, впервые созданной отечественной сверхмногоканальной системой, организованной по магистрально-модульному типу с шиной ISA на базе персонального компьютера Pentium.

В системе ГРОТ впервые применена подсистема регистрации данных на магнитооптические диски. Системой ГРОТ были оснащены 5 судов новой постройки, в т.ч.

"Южморгеология", "Севморгеология", "Геленджик".

Разработки защищены авторскими свидетельствами СССР: №№ 718914, 705897, 968855, 1040931, 1215503.

Системами ГРАД, ГРАД-АМ, ГАР и ГРОТ было оснащено 30 научно-исследовательских судов организаций Мингео СССР, Мингео Украины и АН СССР.

Цифровые приемные системы (косы)

Внедрение многоканальной цифровой аппаратуры для регистрации данных морской сейсморазведки создало предпосылки к увеличению числа каналов приемного устройства (косы) до 500 и более, при общей протяженности косы до 6000 метров.

Для реализации сверхмногоканального, более 120 каналов, приемного устройства были разработаны новые схемотехнические и конструктивные решения, позволяющие оцифровывать сигналы приемников каждого канала непосредственно в косе и транслировать данные на бортовую систему сбора и регистрации "ГРОТ" или бортовую ЭВМ.

Результатом выполненных в ОКБ "Спектр" работ впервые в СССР были созданы цифровые приемные системы для сейсмических и сейсмоакустических работ в том числе:

- **цифровая приемная система ГОНГ** протяженностью 1600 метров, на 24 сейсмоприемных канала, объединенных в группу по 2 канала в каждой, с полосой рабочих частот 15-140 Гц;

- **цифровая телеметрическая приемная система "ГЮИС-24"**, являющаяся более совершенной модификацией системы "ГОНГ" с числом каналов до 240, протяженностью до 6000 метров.

- **цифровая телеметрическая приемная система "ГЮИС-А6"** на 6 каналов с расширенным диапазоном рабочих частот 5-700 Гц.

Системы ГОНГ, ГЮИС-24, ГЮИС-А6 защищены авторскими свидетельствами СССР №№ 437193, 558236, 903780, 1000970, 1040445.

Навигационные системы

С целью обеспечения навигационной привязки результатов обработки данных и управления сейсморазведочными работами ОКБ "Спектр" совместно с Рязанским Радиотехническим институтом (в настоящее время Рязанский Государственный радиотехнический университет) разработали в 1979 – 1983 г.г. **доплеровскую гидроакустическую систему "АКВА-1"**.

Система отличалась повышенной точностью определения навигационных параметров судна, малогабаритностью и совместно с системами ГАР и ГРОТ позволяла управлять источником возбуждения.

Системой "АКВА-1" было оснащено НИС "Федынский" (1979 г.) и геофизические суда новой постройки в т.ч. "Севморгеология", "Южморгеология", "Геленджик" (1983 – 85 г.г.).

Работа защищена авторскими свидетельствами СССР №№ 644285, 6953314, 814064, патентами США №4283763, 1981 г., Франции №2464522, 1981 г. и ФРГ №2933248, 1983 г.

Системы для гравиметрии

В начале 70-х годов в связи с разработкой в институте ВНИИгеофизика комплекса струнных датчиков и началом работ в области аэрогравиметрии, по заданию Мингео СССР ОКБ "Спектр" разработало **систему цифровой ре-**

гистрации данных аэро-морской гравиметрической съемки "Гравитон", обеспечивающую резкое повышение производительности и точности гравиметрических работ, прежде всего в недоступных и труднодоступных районах за счет многоканальной цифровой регистрации показаний струнных гравиметров в совокупности с показаниями акселераторов, высотомера, других средств съемки.

В 1974 – 1976 г.г. было изготовлено 4 системы "Гравитон", с использованием которых были проведены работы в районах Новой земли и Земли Франца-Иосифа.

Разработка защищена авторскими свидетельствами СССР №№594464, 613636, 624350.

Системы для глубоководных аппаратов

В середине 70-х годов одним из стратегических направлений освоения минеральных ресурсов глубоководных районов Мирового океана становятся исследования в области разведки железомарганцевых конкреций (ЖМК).

Поиск и разведка ЖМК осуществляется с помощью исследовательских судов, оснащенных средствами оптической и акустической съемки дна набортными и глубоководными, с использованием буксируемых подводных аппаратов, системами.

Промышленные средства съемки с использованием глубоководных аппаратов, как и сами глубоководные аппараты, на тот период отсутствовали.

В рамках возложенных на НПО "Южморгеология" задач по созданию глубоководных буксируемых аппаратов с комплексом средств съемки морского дна, ОКБ "Спектр" в 1981-90г.г. разработало подсистемы **ГНОМ, ГНОМ-К, ГНОМ-В** сбора и передачи на борт надводного судна данных в цифровой форме по кабель-тросу длиной до 6 км., с регистрацией системами ГАК и ГРОТ.

При создании указанных систем использовалась вся совокупность новых технических решений, защищенных вышеперечисленными авторскими свидетельствами СССР.

Судовой навигационно-геофизический комплекс, реализованный с применением разработанных систем, показан на рис.1.

С применением созданной в ОКБ "Спектр" цифровой аппаратуры для морских геофизических исследований, за период с 1970 года морскими организациями Мингео СССР выполнены:

- сотни тысяч погонных километров региональных и детальных сейсмических профилей на всех шельфовых акваториях морей, омывающих Россию;
- выявлено около 500 структур, перспективных на нефть и газ;
- открыто 29 морских месторождений нефти и/или газа;
- осуществлено, в рамках Конвенции по морскому праву, закрепление за Россией районов залегания железомарганцевых конкреций в Тихом океане в зоне Клариян – Клиппертон, общей площадью 300000 кв.км.;
- выполнена высокоточная аэрогравиметрическая съемка в труднодоступных районах крайнего Севера и Антарктиды.

Созданные в ОКБ "Спектр" системы демонстрировались на международных выставках "Океан – ЭКСПО – 80" г. Бордо, Франция, "Геологоразведка – 80" СССР, и на ВДНХ СССР в 1974, 1977, 1978, 1981, 1982г.г.

За высокий уровень разработок специалисты ОКБ "Спектр" были отмечены Золотыми (2), Серебряными (4), Бронзовыми (9) медалями ВДНХ СССР, а ОКБ "Спектр" награждено дипломом ВДНХ СССР 3-й степени.

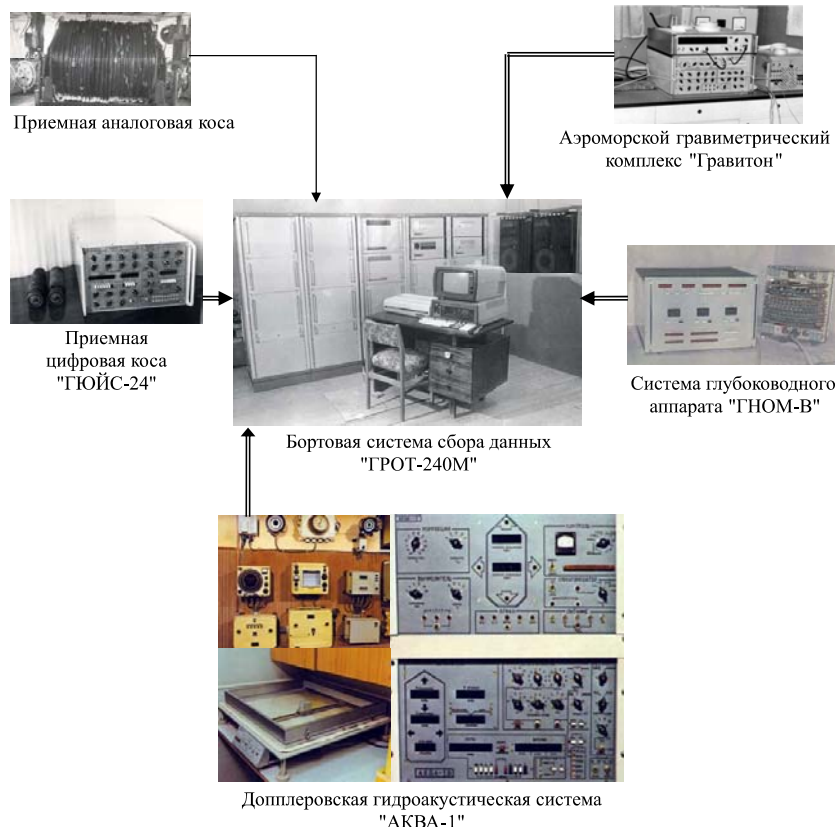


Рис.1 Судовой навигационно-геофизический комплекс

Литература

1. Краев А.Г. К черному золоту шельфов – М.: Издательство Московского государственного университета, 2003.

Краев А.Г., Шлыков С.Г.

2. Экономические показатели и технические средства морских сейсморазведочных работ на нефть и газ за рубежом, Обзор. Морская геология и геофизика. М., ВИЭМС, 1976г.
3. Смолдырев А.Е. Методика и техника морских геологоразведочных работ. М., "Недра", 1978.
4. Полшков М.К. Теория аналоговой и цифровой сейсморазведки. М., "Недра", 1973.
5. Слуцковский А.И. Сейсморазведочная аппаратура. М., "Недра", 1970.
6. Юзefович А.П., Огородова Л.В. Гравиметрия. Учебник для вузов. – М.: "Недра", 1980.
7. Ю.Б.Казмин, А.Н.Волков, И.Ф.Глумов и др. Международно – правовые и экономические проблемы поиска, разведки и освоения минеральных ресурсов глубоководных районов Мирового океана. – Геленджик: ПО "Южморгеология", 1989.
8. Лукашков А.В., Матвеев Ю.И., Биржаков М.Б. Использование глубоководных аппаратов для геологоразведочных

работ в океане (по зарубежным данным). – Морская геология и геофизика. Обзор М., ВИЭМС, 1985.

A SET OF SOFTWARE AND HARDWARE TOOLS FOR PERFORMING GEOPHYSICAL ACTIVITIES AIMED AT USING THE WORLD OCEAN'S RESOURCES

E.B. Frank, N.N. Dobytychin, O.V. Strougalev

The article describes a set of software and hardware tools designed by Special Design Bureau "Spectr" in the period of 1970-2000s for performing geophysical research work in the World Ocean. The aim of this work was to use the natural resources in the shelf area as well as in the deep ones. The article also describes the history of these tools' creation and the main performance characteristics of the designed systems.



TEXAS INSTRUMENTS INC. выпускает новый процессор платформы **DaVinci TMS320DM8168**. Процессор открывает новые горизонты вычислительных мощностей, обеспечивая 4-кратное увеличение производительности в формате HD, реализацию перспективных кодеков и видеоакселераторов, обладает высокой степенью интеграции при низком энергопотреблении.

Процессор строится на базе ядра общего назначения ARM Cortex A-8 с частотой 1 ГГц и DSP-ядра с плавающей точкой C674x+ с частотой 1 ГГц.

Подробнее: <http://www.ti.com>

TEXAS INSTRUMENTS INC. представляет новую линейку микроконтроллеров **TMS570** для систем безопасности транспортных средств. Контроллеры используют процессорное ядро ARM® Cortex™-R4F с плавающей точкой, работающее на частоте 160 МГц.

Подробнее: <http://www.ti.com/ww/en/mcu/tms570/index.shtml>



TEXAS INSTRUMENTS INC. предоставляет разработчику систем на базе DSP возможность использования нового бесплатного программного инструментального средства **C6EZFlo** графической разработки приложений для процессоров C6000™.

Подробнее: <http://www.ti.com/c6flo-etechtf>

УДК 629.7.071

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО И СВОЕВРЕМЕННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Атаманчук Ю.И., начальник сектора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4373@spectr.ryazan.ru

Луковников К.Б., ведущий инженер-программист, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4373@spectr.ryazan.ru

Фалеев О.В., начальник отдела, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4373@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: измерительная информация, РКТ, нештатные ситуации, ТМП, кластерный анализ, контроль качества, информативность.

Предлагаемый алгоритм выявления нештатных ситуаций при испытаниях изделий ракетно-космической техники заключается в сравнении измерительной информации, характеризующей текущее состояние изделия РКТ с фрагментами измерительной информации, характерными для нештатных ситуаций и выдаче соответствующего заключения.

Модель выявления нештатных ситуаций может осуществляться различными способами и характеризоваться такими параметрами как: частота опроса датчиковой аппаратуры, тип параметра, время функционирования, наличие разрывов, монотонность и многими другими.

Алгоритм выявления нештатных ситуаций основан на априорном накоплении измерительной информации предыдущих испытаний в базе данных (БД) и последующем сопоставлении эталонных данных с анализируемыми по следующим методикам:

- 1) статистической;
- 2) корреляционной;
- 3) графическо-визуальной.

При этом вывод о наступлении нештатной ситуации носит вероятностный характер. Значение вероятности зависит от ряда факторов, таких как: номенклатура параметров признакового пространства, полнота и достаточность БД признаков используемой методики (1-3) и может колебаться в пределах 0.7-0.99. Наиболее точной, но и существенно ресурсоёмкой, является методика 3 (графическо-визуальная).

После проведения работ по анализу измерительной информации и получения истинного заключения о наступлении нештатной ситуации должна пополняться БД признаков.

Ввиду неравнозначной точности и ресурсоёмкости методик (1-3), более качественный результат даёт их последовательное использование с применением полученных результатов.

Статистическая методика предполагает для идентификации события использование статистических характеристик, оцениваемых по полученным данным. Их накопление, статистическая обработка и последующий

В настоящей статье описан алгоритм выявления нештатных ситуаций при испытаниях изделий ракетно-космической техники с использованием статистических характеристик измерительной информации для идентификации (классификации), контроля качества и определения информативности ТМП.

анализ на основе сравнения с эталонными позволяют идентифицировать изменение состояния изделия РКТ.

Пусть для i -го параметра выделенные из общего объема измерительной информации измерения образуют множество:

$$X_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{M_i}\}, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (1)$$

где M_i - объём выборки. Совокупность всевозможных значений измерений параметра (словоформу) представим как алфавит параметра:

$$A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_{N_i}\},$$

$$a_j > a_{j-1}, a_j \neq a_k, j, k \in \{1, 2, 3, \dots, N_i\}, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (2)$$

где a_j - словоформа алфавита $A_i \subset X_i$, в качестве которых будем использовать словарь нулей и единиц или словарь битовых словоформ.

Объединим N_i в множество N_y , упорядоченное по убыванию:

$$N_y = \{N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_{K_{\Pi}}\},$$

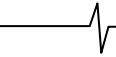
$$N_i > N_{i-1}, i \in \{1, 2, 3, \dots, K_{\Pi}\}, \quad (3)$$

Из (3) выделим $N_{\max} = N_1$, $N_{\min} = N_{K_{\Pi}}$ и доопределим множества разброса $A_{\max}$ и $A_{\min}$ мощностей алфавитов:

$$A_{\max} = \{N_{\max, l}, l = 1, 2, 3, \dots\}, A_{\min} = \{N_{\min, l}, l = 1, 2, 3, \dots\}, \quad (4)$$

где $N_{\max, l}, N_{\min, l} \in N_y$ - мощности алфавитов (3) на l -м сеансе анализа.

Если хотя бы одно их текущих значений $N_{\max}, N_{\min}$ выходит за диапазон разброса соответствующего множества (4), то имеется изменение смыслового содержания информации. Примем решение о включении $N_{\max}, N_{\min}$ в (4) после анализа по $v = 1, 2, \dots, V$ выборкам путём оценки диапазонов разброса мощностей их алфавитов $N_{\min, v}, N_{\max, v}$. Если для всех $v = 1, 2, \dots, V$



$$N_{\min} - \eta < N_{\min, \nu} < N_{\min} + \eta, N_{\max} - \mu < N_{\max, \nu} < N_{\max} + \mu,$$

где η и μ - допуски, то $N_{\max}, N_{\min}$ включим в (4). Выбор значений η и μ определяется исходя из значимости изменения смыслового содержания и позволяет идентифицировать либо несущественные изменения, связанные с физикой контролируемых процессов, либо радикальные изменения, т.е. наступление факта нештатной ситуации.

Произведём валовую маркировку элементов (1), т.е. определим количество измерений i -го параметра Q_{aj} для каждого $a_j \in A_i$ в (2), и построим эмпирическую плотность распределения словоформ (монограмм):

$$P_i = \{p_j = Q_j^a / M_i, j = 1, 2, \dots, N_i\}, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}. \quad (5)$$

Под биграммой будем понимать два рядом стоящих значения (1). Анализ биграммных зависимостей позволяет более детально и глубоко оценить информативность параметров. Для построения плотности распределения частот встречаемости биграмм произведём маркировку (1) таким образом, что каждое последующее значение биграммы берется со сдвигом на одно значение относительно начала предыдущей. В результате и получим матрицу:

$$W_i = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} \dots & w_{1,N_i} \\ \dots & w_{j,k} & \dots \\ w_{N_i,1} & w_{N_i,2} \dots & w_{N_i,N_i} \end{bmatrix}, j, k \in \{1, \dots, N_i\}, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (6)$$

где $w_{j,k} = Q_{aj,k} / M_i$ - частота встречаемости биграммы (a_j, a_k) .

Для проверки отличия распределения от равновероятного вычислим статистику $\chi_{M,i}^2$ для монограмм и статистику $\chi_{B,i}^2$ для биграмм /68,90,110/:

$$\chi_{M,i}^2 = \sum_{j=1}^{N_i} \left(p_j - M_i / N_i \right)^2 / \left(M_i / N_i \right), i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (7)$$

$$\chi_{B,i}^2 = \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} \left(w_{jk} - (M_i - 1) / N_i^2 \right)^2 / \left((M_i - 1) / N_i^2 \right), i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (8)$$

где M_i / N_i и $(M_i - 1) / N_i$ - элементы равновероятного распределения.

Далее по уровню отбраковки $\chi_{\kappa p}^2$ с доверительной вероятностью P_d проверим правильность одной из гипотез: H_0 - значения параметра распределены равновероятно; H_1 - значения параметра распределены неравновероятно. Если $\chi_i^2 < \chi_{\kappa p}^2$, то принимается H_0 , в противном случае - альтернативная гипотеза H_1 . Равновероятное распределение является важным признаком изменчивости смыслового содержания. На параметры, для которых принимается гипотеза H_0 для монограмм и биграмм одновременно, следует обращать особое внимание. Для них проведём анализ по следующим направлениям: проверка информативности; проверка на соответствие эталонным распределениям; анализ законов распределения, характеризующих непрерывность сообщений.

Проверку информативности (избыточности) будем вести на основе статистик, аналогичных энтропии. Для этого по (5) и (6) определим среднюю информативность

одного символа (монограммы) H_1 и среднюю информативность биграмм H_2 :

$$H_1 = - \sum_{j=1}^{N_i} (p_j / N_i) \log(r_j / N_i); \quad (9)$$

$$H_2 = -1/2 \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} (w_{jk} / N_i) \log(w_{jk} / N_i), \quad (10)$$

Отметим, что измерения параметров при испытаниях изделий РКТ, как правило, обладают большой избыточностью, поэтому должны выполняться условия

$$H_1 \ll H_{1,\max} = - \sum_{j=1}^{N_i} (1/N_i) \log(1/N_i) = \log(N_i), \quad (11)$$

$$H_2 \ll H_{2,\max} = -1/2 \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} (1/N_i^2) \log(1/N_i^2) = \log(N_i). \quad (12)$$

Из (11) и (12) вычислим соответствующие избыточности:

$$I_1 = \frac{1 - H_1}{H_{1,\max}}, I_2 = \frac{1 - H_2}{H_{2,\max}}.$$

Для малоизменчивых параметров при больших M_i должно выполняться $I_2 > I_1 \gg 0$. Изменчивые параметры, напротив, обладают нулевой избыточностью, т.е. $I \rightarrow 0$. Кроме того, для каждого разряда ИС будем также вычислять его избыточность I_l , $l = 1, \dots, P_{\text{ИС}}$, с использованием более глубоких зависимостей, чем биграммные. Отметим, что, во-первых, для малоизменчивых непрерывных параметров $I_l \rightarrow 1$ для $l \rightarrow P_{\text{ИС}}$, во-вторых, для изменчивых (зашумлённых) параметров $I_l \rightarrow 0$ для всех $l = 1, \dots, P_{\text{ИС}}$, в-третьих, для прерывистых параметров $0 < I_l < 1$.

После принятия гипотезы H_1 по критериям (7), (8) продолжим оценку достоверности параметров путём проверки степени соответствия их эмпирических распределений эталонным. Вначале по (5) определим распределения рангов:

$$R_i = \{r_j \leftrightarrow p_j, r > r_{j+1}, j = 1, \dots, N_i\}, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (13)$$

и проверим их соответствие эталонным распределениям

$$R_i^{\exists} = \{R_{i,s}^{\exists} = \{r_j^{\exists}, j = 1, 2, \dots, N_{i,s}\}, s = 1, 2, \dots, S_i\}, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (14)$$

полученных при анализе предыдущих сеансов или спрогнозированных теоретически, где $N_{i,s}$ - мощность алфавита для каждого из $R_{i,s}$.

Распределения (14) содержат статистическую информацию о законе распределения вероятностей изменений параметров - средние вероятности использования словоформ (2) в последовательностях (1). При этом, можно формировать наборы вида (14) для разной информации и условий анализа. Поставим в соответствие каждому параметру наборы вида:

$$\chi_i^2, P_i \leftrightarrow \{R_{i,s}^{\exists}, N_{i,s} \in [A_{\min,s}, A_{\max,s}], s = 1, 2, \dots, S_i\}, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (15)$$

где $A_{\min,s}, A_{\max,s}$ - множества мощностей алфавитов, аналогичные (4) для распределений (13). Затем вычислим:

$$\chi_{i,s}^2 = \sum_{j=1}^L (r_j - r_j^{\exists})^2 / r_j^{\exists}, s = 1, 2, \dots, S_i, i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (16)$$

где $L = N_{is}$, если $N_i > N_{is}$ и $L = N_i$, если $N_{is} > N_i$.

Выберем $R_{i,s}^2$, у которого $\chi_{\min,s}^2 = \min \chi_{i,s}^2$. Если $\chi_{\min,s}^2 < \chi_{кр,s}^2$, то параметр идентифицирован. В противном случае среди (13) нет распределения, соответствующего данному параметру. Тогда либо данный параметр ранее не опрашивался, либо измерения параметра сильно отличаются от предыдущих, либо имеет место разрушение смыслового содержания помехами. Мера (16), оцениваемая по серии выборок (1), даёт оценки достоверности и качества измерительной информации.

Для построения плотностей распределения, характеризующих непрерывность изменения значений параметров (1), определим последовательность $X_{pi} = \{x_2 - x_1, x_3 - x_2, \dots, x_{M_i} - x_{M_i-1}\}$, $x_{pi} < aN_i$ и произведём маркировку положительных, отрицательных и нулевых приращений, которые формируют плотности распределений вида:

$$Q_i^+ = \{q_j^+, j = 1, 2, \dots, N_i\}, \quad Q_i^- = \{q_j^-, j = 1, 2, \dots, N_i\},$$

$$i = 1, 2, \dots, K_{\Pi}, \quad (17)$$

где $q + j, q - j \in X_{pi}$ - количества положительных и отрицательных приращений.

Анализ (17) будем проводить по критерию, аналогичному (15), сопоставлением Q_i^+ , Q_i^- с эталонными $Q_{э+i,s}$, $Q_{э-i,s}$ и с равномерно распределёнными. Кроме того, наличие в (17) большого числа максимальных приращений свидетельствует о высокой динамике поведения параметра. И напротив, большое число минимальных элементов и стремление максимальных к 0 в (16) говорит о ровной динамике параметра.

Таким образом, рассмотренный алгоритм позволяет решить задачу выявления нештатных ситуаций на семантическом уровне, т.е. идентифицировать принадлежность данных предоставленных фрагментов измерительной информации к той или иной типовой структуре, характеризующей факт наступления нештатной ситуации. Этот алгоритм включает последовательное выполнение следующих процедур. Во-первых, по выборкам (1) выполняется оценка распределения данных предоставленного фрагмента по (2), (5), (6), (13), (16), а также оценка мощностей алфавитов (3). Во-вторых, на основе сопоставления полученных оценок распределений с набором эталонных по (7), (8), (9)-(16) делается вывод о характерной структуре измерительной информации. В-третьих, для оценки степени доверия принятого решения оценивается информативность сообщения по (9)-(12).

Наполнение базы эталонов (14) может быть проведено за ограниченное время путём анализа как перекрывающихся, так и неперекрывающихся выборок анализируемых информационных процессов, а также формированием теоретических распределений. Устойчивость оценивания достигнута анализом усреднённых эмпирических распределений выборок данных и их сравнением с эталонами.

Корреляционная методика предназначена для вычисления оценок корреляционной функции по выборке данных и предусматривает расчёт автокорреляционной и взаимокорреляционной функций. Алгоритм позволяет определить оценки периодичности путем замера периода межпиковых расстояний автокорреляционной функции (АКФ), вычисляемой по выборке из анализируемой

последовательности данных.

Эта обработка используется для количественной оценки степени схожести фрагментов измерительной информации: эталонного и текущего. При этом величина статистического точечного коэффициента взаимной корреляции определяет степень соответствия фрагментов друг другу.

$$K_x(mT) = \frac{1}{(N_s - m) \sum_{i=1}^{N_s - m} [X(iT_o) - M(X_i T_o)] * [X(iT_o + mT_o) - M(X(iT_o + mT_o))]},$$

$$m = 0, N_a - 1, \quad (18)$$

где m - номер отсчёта АКФ (mT_o - интервал сдвига);

N_s - объём выборки (слов);

N_a - количество точек АКФ;

M^a - операция математического ожидания;

T_o - длительность между измерениями X_i и X_{i+1} (период опроса).

При этом можно определить период или частоту собственных колебаний. Анализ характера взаимокорреляционной функции (ВКФ) используется для решения задач определения характера и свойств связи двух исследуемых процессов, эталонного и текущего. Корреляционные функции позволяют установить факты зависимости данных и оценить некоторые их характеристики.

Графическо-визуальная методика классифицирования телеметрируемых параметров (ТМП) основана на представлении измерительной информации в графическом виде и последующем экспертном оценивании степени принадлежности (схожести) графика к ранее занесенному в базу данных, характеризующему факт наступления той или иной нештатной ситуации.

Таким образом, статистические характеристики (алфавит сообщений, законы распределения словоформ и т.д.), оцениваемые для ТМП могут быть использованы для идентификации (классификации), контроля качества и определения информативности ТМП. Накопление этих характеристик, их статистическая обработка и последующий анализ на основе сравнения с эталонными значениями позволяют идентифицировать изменения смыслового содержания сообщений в результате разрушающего воздействия помех, использования кодирования или шифрования, а также дают оценки качества ТМП.

Литература

1. Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис - ЦОС. Практический подход. Второе издание. Пер. с англ. Москва • Санкт-Петербург • Киев. Издательский дом «Вильямс» 2004 г.
2. Л. Рябинер, Б. Гоулд - Теория и применение цифровой обработки сигналов. Перевод с английского. Издательство «Мир». Москва 1978 г.
3. Фукунага К., Введение в статистическую теорию распознавания образов. Москва: Наука, 1979.

This article describes a procedure for detection of abnormal situations within rocket and space equipment tryouts using the statistical characteristics of measurement data to identify (classify), control the quality and assess the information content of telemetrical parameters.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДУЛЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Светников О.Г., заместитель директора филиала – первый заместитель главного конструктора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», к.т.н., заслуженный изобретатель РФ, teandr@spectr.ryazan.ru

Симкин В.В., главный специалист, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», к.т.н., доцент, 4371@spectr.ryazan.ru

Ключевые слова: программируемые логические контроллеры, модули сопряжения, способы повышения надежности и быстродействия, схемотехническая реализация.

При создании автоматизированных систем управления технологическими процессами подготовки и пуска ракет различного назначения одной из задач является проектирование программируемых логических контроллеров (ПЛК), которые обеспечивают преобразование, сбор, предварительную обработку информации от датчиков и выдачу команд на исполнительные элементы объекта управления. Ракетный космический комплекс является сложным техническим объектом, на котором установлено большое количество источников информации с широким диапазоном частотных характеристик, различными интенсивностями измерительных потоков, разнотипными электрическими интерфейсами и форматами данных [1]. Кроме того, процессы подготовки и пуска ракет осуществляются в условиях воздействия промышленных и внешних помех, как на объект управления, так и на сложное наземное технологическое оборудование, подключаемое к объекту управления с использованием проводных и кабельных соединений различной длины.

Узловыми аспектами проектирования ПЛК являются повышение их надежности, помехоустойчивости и быстродействия. Для решения данных задач необходимо рационально распределить функции между аналого-цифровым модулем сопряжения с датчиком и цифровым аппаратно-программным модулем ПЛК, реализуемым с использованием ЗУ или ППЗУ. Рассмотрим способы и структурные особенности построения модулей сопряжения, позволяющие обеспечить повышение функциональных и эксплуатационных характеристик.

При схемотехнической реализации модулей сопряжения широко используется способ симметрирования входных цепей, который является основным методом подавления шумов во входных цепях за счет обеспечения одинаковых шумовых составляющих сигнала по обоим входам дифференциального каскада [2]. Однако, и в условиях высокой степени симметрирования входной сигнал дифференциального каскада часто бывает искажен и поперечной, и продольной помехой. Поэтому в структурах нормализаторов сигналов модуля сопряжения, особенно при усилении напряжений и электриче-

Анализируются способы и схемотехническая реализация модулей сопряжения повышенной надежности, помехоустойчивости и быстродействия. Рассматриваются методики выбора параметров модулей сопряжения и оценки их основных характеристик.

ских зарядов, широко используются разделительные конденсаторы. Известен широкий класс усилителей [3], содержащих во входных цепях разделительные конденсаторы, нижняя граничная частота усиления f_H которых на уровне 3 дБ определяется величиной постоянной времени входной разделительной цепи:

$$f_H = (2\pi RC)^{-1}. \quad (1)$$

В них даже при невысоких требованиях к уровню частотных искажений во входных разделительных цепях приходится ставить конденсаторы большой емкости. Простейшие расчеты показывают: при $f_H \leq 5$ Гц необходимая величина разделительной емкости превышает 20 мФ, что говорит о необходимости применения в данном случае электролитического конденсатора.

Аналогичная проблема возникает и в усилителях электрических зарядов, где разделительный конденсатор используется, в частности, при работе с пьезоэлектрическими датчиками [3].

Применение электролитических конденсаторов в разделительных цепях усилителей ПЛК нежелательно по целому ряду причин. В сравнении с керамическими они обладают низкой добротностью, имеют низкую надежность и температурную стабильность основных параметров. Поэтому в составе усилителя электролитические конденсаторы в значительной мере определяют нестабильность его характеристик и уровень надежности функционирования. Однако, для того чтобы во входных разделительных цепях усилителей можно было заменить электролитические конденсаторы на керамические, необходимо многократно уменьшить величину их емкости без увеличения уровня частотных искажений. Обеспечить это можно за счет создания условий взаимодействия входных разделительных RC-цепей с цепями внутренней структуры усилителя, при которых передаточная функция усилителя превращается в действительное число [4]. Это можно сделать, если рассматривать структуру дифференциального каскада как структуру операционного преобразователя, общие принципы построения которого изложе-

ны в [5]. Схема операционного преобразователя изображена на рис.1,

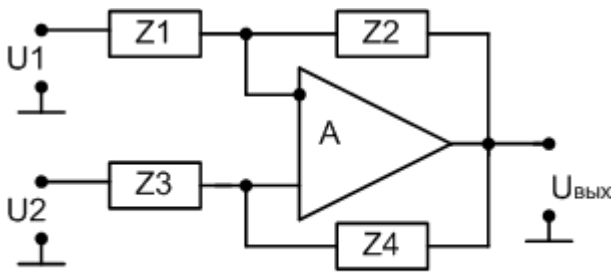


Рис. 1

где: $Z_1(p), Z_3(p), Z_4(p)$ – операторные сопротивления двухполюсников входных цепей преобразователя;

$Z_2(p)$ – операторное сопротивление цепи отрицательной обратной связи преобразователя;

p – оператор Лапласа.

Передаточная функция преобразователя ПЛК по инвертирующему и неинвертирующему входам определяется соответственно соотношениями [5]:

$$W_1(p) = -Z_2(p)/Z_1(p); \quad (2)$$

$$W_2(p) = [Z_2(p)/Z_1(p)] \times [1 + Z_1(p)/Z_2(p)] / [1 + Z_3(p)/Z_4(p)] \quad (3)$$

Если в качестве двухполюсников в структуре ПЛК рис. 1 использовать RC-цепи с последовательным соединением элементов, то получим схему дифференциального усилителя переменного напряжения. Схема такого усилителя изображена на рис. 2,

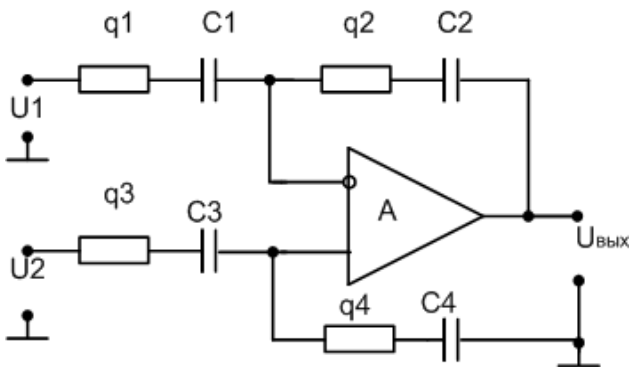


Рис. 2

где: q_1, q_2, q_3, q_4 – активные проводимости RC-цепей;

C_1, C_2, C_3, C_4 – емкости RC-цепей.

Элементы схемы задают значения передаточных проводимостей цепей усилителя:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 1/Z_1 = q_1 p C_1 (p C_1 + q_1)^{-1}; \\ Y_2 &= 1/Z_2 = q_2 p C_1 (p C_2 + q_2)^{-1}; \\ Y_3 &= 1/Z_3 = q_3 p C_3 (p C_3 + q_3)^{-1}; \\ Y_4 &= 1/Z_4 = q_4 p C_4 (p C_4 + q_4)^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Передаточная функция усилителя в соответствии с (3) будет иметь вид:

$$W_1(p) = -Y_1/Y_2 = -q_1 p C_1 (p C_1 + q_1)^{-1} (q_2 p C_2)^{-1} (p C_2 + q_2). \quad (5)$$

Для того чтобы в схеме преобразователя рис.2 отсутствовали частотные искажения за счет входных разделительных цепей, достаточно обеспечить условия, при которых передаточная функция преобразователя по обоим входам была бы равна действительному числу. По инвертирующему входу преобразователя ПЛК для этого достаточно обеспечить равенство параметров элементов входной разделительной цепи и соответствующих элементов отрицательной обратной связи:

$$q_1 = q_2 = q; \quad (6)$$

$$C_1 = C_2 = C. \quad (7)$$

В этом случае согласно (5) $W_1(p) = -1$.

Передаточная функция (5) равна действительному числу и в том случае, когда соотношение между параметрами однотипных элементов этих цепей равно некоторому действительному числу K , то есть, когда для обоих типов элементов RC-цепей выполняются равенства:

$$q_1 = K q_2 = q; \quad (8)$$

$$C_1 = K C_2 = C. \quad (9)$$

В этом случае в структуре преобразователя ПЛК также обеспечивается полная взаимная компенсация емкостных проводимостей цепей Y_1, Y_2 .

Аналогичным образом для неинвертирующего входа преобразователя, согласно (3), можно получить $W_2(p) = 1$, если совместно с условиями (6), (7) выполняется условие:

$$Z_2(p)/Z_1(p) = Z_3(p)/Z_4(p),$$

то есть когда:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q; \quad (10)$$

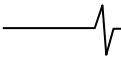
$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C. \quad (11)$$

Или можно получить равенство $W_2(p) = K$, если выполняются условия:

$$q_1 = K q_2 = q_3 = K q_4 = q; \quad (12)$$

$$C_1 = K C_2 = C_3 = K C_4 = C. \quad (13)$$

Условия (10), (11), (12), (13) задают соотношения между параметрами однотипных элементов RC-цепей и не обуславливают какие-либо ограничения на величину этих параметров. Следовательно, можно ожидать, что даже при самых минимальных значениях параметров RC-цепей, если выполняются условия (10), (11) или условия (12), (13), преобразователь рис.2 будет обеспечивать минимальные частотные искажения, вызываемые только паразитными параметрами операционного усилителя. Однако нормально функционировать такой преобразователь не будет, так как в его структуре отсутствует отрицательная обратная связь по постоянному току. Для стабилизации рабочей точки усилителя и обеспечения устойчивой работы необходимо ввести в его структуру сопротивление отрицательной обратной связи по постоянному току. Однако это сопротивление в совокупности с проходным сопротивлением операционного усилителя шунтирует RC-цепь отрицательной обратной



связи преобразователя ПЛК, нарушая тем самым условия (10), (11) или (12), (13). Для оценки влияния этого элемента на работу устройства рассмотрим упрощенную схему усилителя с одним (инвертирующим) входом и дополнительной проводимостью $q_0 = 1/R_0$, имитирующей сопротивление цепи отрицательной обратной связи по постоянному току и проходное сопротивление операционного усилителя. Схема такого усилителя изображена на рис. 3.

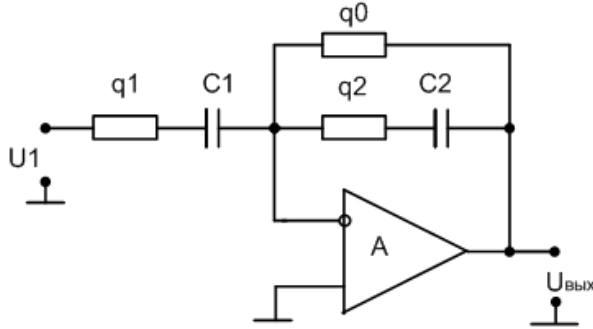


Рис. 3

Передаточная проводимость Y_{21} цепи отрицательной обратной связи в таком случае будет определяться соотношением:

$$Y_{21} = q_2 p C_2 (p C_2 + q_2)^{-1} + q_0,$$

и передаточная функция $W_3(p)$ усилителя рис. 3 будет иметь вид:

$$W_3(p) = -Y_1/Y_{21} = -q_1 p C_1 (p C_1 + q_1)^{-1} \times \\ \times [q_2 p C_2 + q_0 (p C_2 + q_2)^{-1} (p C_2 + q_2)]$$

При выполнении условий (10), (11) последнее соотношение упрощается:

$$W_3(p) = -[1 + q_0 q^{-1} + q_0 (p C)^{-1}]^{-1}. \quad (14)$$

Осуществив переход $p \rightarrow j\omega$, где ω – круговая частота, определим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) преобразователя:

$$W_3(\omega) = [1 + R/R_0]^2 + (\omega \tau_0)^{-2}]^{-0.5}. \quad (15)$$

Здесь $\tau_0 = R_0 C$ – постоянная времени RC-цепи.

На нижней граничной частоте $\omega = \omega_H = 2\pi f_H$ спад АЧХ не должен превышать 3 дБ. Согласно (15), это будет выполняться при условии:

$$1 + R/R_0 = (\omega_H \tau_0)^{-1}. \quad (16)$$

Следовательно:

$$\omega_H = 1/(R + R_0)C. \quad (17)$$

Если в схеме преобразователя ПЛК использовать операционный усилитель с полевыми транзисторами на входе, то сопротивление обратной связи R_0 можно увеличить до нескольких МОм. Так, например, для обеспечения значения нижней граничной частоты $f_H = 5$ Гц, при величине сопротивления $R_0 = 6$ МОм, в структуре рассматриваемого преобразователя достаточно иметь величину разделительной емкости 5000 пФ, что в несколько тысяч раз меньше, чем необходимая величина разделительной емкости в традиционной структуре уси-

лителя. Малая величина разделительной емкости позволяет использовать в качестве ее керамический конденсатор.

Аналогичный результат обеспечивается и в структуре усилителя электрических зарядов, построенной по схеме операционного преобразователя, у которого передаточная функция равна действительному числу. Такой подход позволяет либо многократно снизить необходимую величину разделительной емкости при заданном уровне частотных искажений, либо значительно снизить уровень частотных искажений при заданной величине разделительной емкости.

Проблема быстродействия в структурах ПЛК особенно остро встает при выполнении одной из наиболее часто встречающихся операций: операции по дистанционному измерению активного сопротивления электрической цепи. При измерениях такого рода в контролируемую цепь контроллера вносится емкость проводов линии связи, соединяющих ее с устройством измерения, а также емкости всех элементов, входящих в измерительный канал. Емкость может быть обусловлена также наличием конденсатора в контролируемой цепи. Подобная ситуация возникает, например, при оценке величины сопротивления утечки выходной цепи источника электропитания, содержащей в своем составе электролитический конденсатор большой емкости. Активное сопротивление такой цепи может быть определено только по окончании переходного процесса, когда заканчивается шунтирующее действие конденсатора на измеряемое сопротивление.

Традиционный способ измерения активного сопротивления электрической цепи предполагает пропускание через нее стабильного по величине тока и измерение падения напряжения на этой цепи [6]. Более точный результат позволяет получить способ [7], при котором стабильный по величине ток пропускают одновременно и через контролируемую электрическую цепь, и через последовательно соединенный с ней масштабирующий резистор. Измеряют падения напряжения на обоих элементах и определяют отношение измеренных величин.

Недостатком обоих способов является то, что при пропускании через контролируемую цепь фиксированного по величине тока, на ней возникает падение напряжения, пропорциональное измеряемому сопротивлению. При больших значениях сопротивления падение напряжения на нем может превысить допустимое значение и вывести из строя контролируемую цепь. Снижение величины тока позволяет уменьшить напряжение на контролируемой цепи, но при этом существенно затягивается по времени процесс измерения. Так, при измерении сопротивления утечки выходной цепи источника электропитания с допустимым напряжением 10 – 15 В длительность процесса измерения может превышать десятки секунд. Существенно сократить время измерения позволяет ПЛК, построенный по схеме [8], и содержащий кроме стабилизатора тока стабилизатор напряжения. Нагрузкой стабилизатора является контролируемая электрическая цепь.

Измерительная цепь ПЛК [8] содержит операционный усилитель А, включенный в цепь отрицательной обратной связи таким образом, что в схеме стабилизирует ток транзистора за счет стабилизации напряжения на

его коллекторе. Контролируемая цепь R_x включается параллельно коллекторному сопротивлению так, что напряжение на ней поддерживается также неизменным и в режиме измерения, и при переходном процессе, когда производится подключение контролируемой цепи к измерителю. За счет цепи глубокой отрицательной обратной связи в данной структуре удастся многократно сократить длительность переходного процесса, возникающего при подключении к измерителю контролируемой цепи, и, как следствие, – сократить время измерения.

Для примера сравним по быстродействию структуру [8] с широко применяемым устройством [6], в котором обеспечивается неизменность тока в контролируемой цепи. Для этого определим реакцию рассматриваемых устройств на подключение к ним в качестве измеряемого сопротивления конденсатора емкостью C . При этом будем полагать, что заряд емкости в обоих случаях производится до одной и той же величины допустимого напряжения U_C , задаваемой в относительных единицах:

$$M = U_C / U_{\Pi}, \quad (18)$$

где U_{Π} – напряжение питания измерителя.

При традиционном способе заряд емкости производится постоянным током I_T и напряжение U_T на конденсаторе C изменяется по линейному закону:

$$U_T = C^{-1} \int I_T dt = I_T t C^{-1}. \quad (19)$$

Время заряда конденсатора t с учетом (18) составит величину:

$$t = M U_{\Pi} C / I_T. \quad (20)$$

В схеме стабилизации напряжения [8] контролируемой цепи в переходном режиме происходит свободный заряд емкости от источника питания U_T через сопротивление открытого транзистора. Напряжение на емкости U_H изменяется по экспоненциальному закону:

$$U_H = U_{\Pi} [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (21)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени заряда емкости, R – суммарное значение сопротивления в цепи заряда емкости. За время t_H напряжение на емкости достигает значения U_C . Согласно (18) и (21), t_H при этом составит величину:

$$t_H = \tau \ln[1/(1-M)]. \quad (22)$$

Тогда отношение t/t_H , характеризующее относительное быстродействие рассматриваемых способов измерения, будет равно:

$$t/t_H = M I_H / I_T^* \ln[1/(1-M)], \quad (23)$$

где $I_H = U_{\Pi} / R$ – начальное значение тока заряда емкости от источника питания через сопротивление R . В рассматриваемых способах измерения напряжение источника питания U_{Π} распределяется между контролируемой цепью и стабилизатором тока или стабилизатором напряжения. Поэтому в большинстве практически важных случаях величина $M = U_C / U_{\Pi}$ не выходит из диапазона значений $1/3 \leq M \leq 2/3$. Соответственно

выражение $H = M / \ln[1/(1-M)]$ будет принимать в этом случае значения из диапазона $0.99 \geq H \geq 0.61$ и существенного влияния на отношение t/t_H не будет оказывать. Тогда, в соответствии с (23), время заряда емкостей и, следовательно, быстродействие сравниваемых способов обратно пропорционально максимальным значениям токов заряда емкостей в каждом из устройств.

При рассматриваемом способе [8] измерения максимальное значение тока заряда емкости ограничивается допустимым значением тока транзистора или тока контролируемой электрической цепи и может достигать нескольких сотен мА при неизменном напряжении на этой цепи.

При традиционном способе измерения, когда через контролируемую цепь пропускается неизменный ток, как уже отмечалось, величина падения напряжения на ней пропорциональна измеряемому параметру, и при жестких ограничениях на напряжение приходится исходить из худшего варианта, ограничивая величину тока десятками мкА. В этих условиях отношение t/t_H может достигать нескольких сотен единиц, что говорит о высокой эффективности способа [8].

Рассмотренные способы и варианты схемотехнической реализации модулей сопряжения, позволяют проектировать ПЛК повышенной надежности, помехоустойчивости и быстродействия, что обеспечивает возможность организации измерительных каналов с высокими функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Литература

1. Меньшиков В.А. Полигонные испытания. М. КОСМО. 1997 – 416 с.
2. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC. Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М.: Мир. 1992. – 589 с.
3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е издание, переработанное и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1988 – 303 с.
4. Патент 2333592 РФ МКИ H03F1/26. Способ обеспечения допустимой величины частотных искажений усилителя и устройство для его осуществления / Светников О.Г., Симкин В.В. № 2006138337/09; заявл. 30.10.2006; опубл. 10.09.2008.
5. Волгин Л.И. Аналоговые операционные преобразователи для измерительных приборов и устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983 г.
6. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин, измерительные преобразователи. – Л.: Энергоиздат, 1983. С. 271.
7. Патент 2247999 РФ МКИ G01R27/02. Способ дистанционного измерения активного сопротивления резистора и устройство для его осуществления / Рабочий А.А.. № 2004100508/28; заявл. 05.01.2005; опубл. 10.03.2005.
8. Патент 2327176 РФ МКИ G01R27/02. Способ дистанционного измерения относительной величины активного сопротивления электрической цепи и устройство для его осуществления / Светников О.Г., Симкин В.В., Спиваков С.С. № 2006122723/28; заявл. 26.06.2006; опубл. 10.01.08.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА В ZETLAB ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Красовский А. А., аспирант, начальник ОИТ ЗАО «ЭТМС»

Землетрясение — сильное колебание земной коры, вызываемое причинами вулканического, тектонического характера [1] или искусственными процессами: взрывы, заполнение водохранилищ, обрушением подземных полостей горных выработок [2].

В России зоны повышенной сейсмической опасности (от 6 баллов и выше, с периодом повторяемости 500 лет) занимают около 40% от общей площади, в том числе 9% территории относится к 8-9 балльным зонам, карта сейсмической активности, в некотором приближении, приведена на рис. 1. Стоит отметить, что в сейсмически активных зонах проживает более 20 млн. человек. Ежегодно на территории России происходят десятки и даже сотни землетрясений, большинство из них протекают незаметно, оставаясь таковыми как для рядовой общественности, так и для исследователей, изучающих протекающие в земле тектонические процессы. Однако, в новейшей истории России, три были сильнейшими: Ши-

котанское (Курилы), октябрь 1994 года, Нефтегорское, май 1995 года, Кроноцкое, декабрь 1997 года [3].

Важность этой задачи не вызывает сомнений, поскольку подобные исследования позволяют накопить статистику о сейсмической обстановке в конкретном регионе — выявить уровень микросейсм, что, в свою очередь, дает возможность специалистам принять решение о размещении тех или иных объектов или проведении различных работ на местности.

Причина затруднений практической реализации мониторинга заключается в том, что малые сейсмические воздействия лишь немного превышают уровень микросейсм, что так же осложняется наличием помех, электрических наводок. На основе экспериментальных исследований в США разработаны нормы для размещения сейсмостанций относительно окружающих источников естественных техногенных шумов [GSE\WG2/2], эти нормы приведены в таблице 1 [4].



Рис. 1. Карта сейсмической активности на территории РФ.

Таблица 1.

Нормы удаленности сейсмостанции от источников шума.

Источник шумов	Расстояние от источника, км
Основные линии электропередач	10 - 15
Основные высокоскоростные дороги	5 - 10
Второстепенные дороги	1 - 3
Трубопроводы, насосные станции и т.д.	3 - 5
Дороги к лесозаготовкам и шахтам	1 - 3
Карьеры и большие шахты	10 - 20
Большие реки	3 - 5
Большие озера, океаны	50 - 100
Бурение глубоких скважин	5 - 10
Города и небольшие деревни	10 - 15

Все приведенные в таблице данные справедливы и применяются до сих пор. Стоит отметить, что в этот перечень потенциально “вредных” для качества сигнала объектов отнесли источники техногенного шума: 1-6, 9, 10. А также природные источники шумов – 7, 8.

Однако, все же бывают случаи, когда избежать близкого расположения техногенных и природных источников шумов невозможно. В попытках найти оптимальное решение задачи обнаружения землетрясения, а именно, определить точный момент времени начала землетрясения на фоне постоянно присутствующих шумов и помех была предложена описанная в настоящей статье система.

Система предназначена для определения самого факта произошедшего землетрясения, в том числе и минимальной магнитуды, и самое главное – поиск начала события с точностью до нескольких отсчетов АЦП, для последующей передачи этой информации в алгоритм пеленгации эпицентра землетрясения, описание которого в данной статье рассматриваться не будет. Отметим, что система требует точного обнаружения времени начала события, в

том числе и в условиях сезонных изменений естественного фона шумов, поскольку шумы варьируют не только в пространстве, но и во времени, т.к. любая станция подвержена суточным и сезонным вариациям [4], что гарантирует повышение точности в задаче поиска эпицентра землетрясения. Это свойство наиболее важно при анализе данных несколькими группами сейсмостанций одновременно, когда две или более сейсмостанций работают совместно в целях обнаружения эпицентра.

Помехи и электрические наводки, являясь шумами техногенного характера, зачастую детерминированы, либо выходят за границы частотного диапазона полезного сигнала. Это говорит о том, что от них, сравнительно легко, можно избавиться различными методами фильтрации: полосовая фильтрация, а так же методы адаптивной фильтрации. Некоторые алгоритмы адаптивной фильтрации очень неплохо описаны в статье А.Б. Сергиенко “Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB” [5], однако, практическая реализация таких систем довольно затруднительна.



Рис. 2. Зона расположения сейсмостанций (выделена цветом).

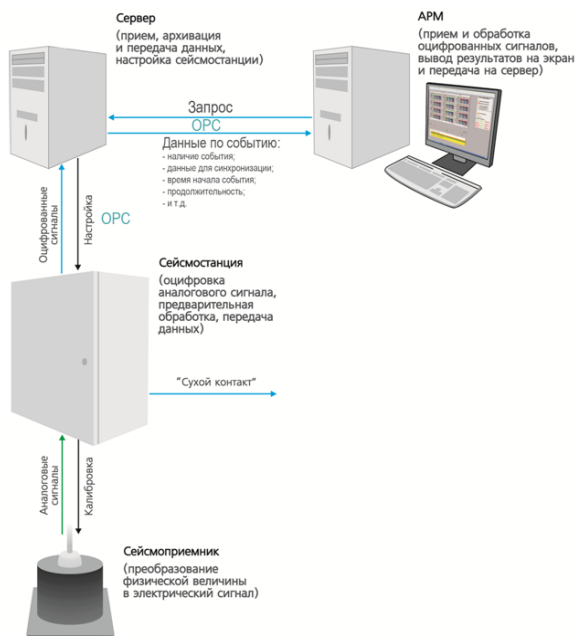


Рис. 3. Схема регистрации сейсмического сигнала и передачи на вычислитель (ПК, производящий математическую обработку сигнала).

Для решения поставленной задачи будем оперировать реально записанным материалом, а именно, будем анализировать запись землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 20 августа 2010 года (рис. 2). Сигнал

был зарегистрирован тремя сейсмостанциями, установленными в районе озера Байкал. Приблизительная схема регистрации приведена на рис. 3.

На схеме регистрации (рис. 3) исходные данные обрабатываются и архивируются на сейсмостанции, передавая на сервер только измеренные параметры: наличие события и время начала события. Для работы системы выбран трехкомпонентный (X,Y,Z) датчик, синхронно регистрирующий отрабатывающий сигнал по всем измерительным осям (рис. 4), что при взаимном анализе показаний по каждой из осей датчика, дает возможность определить вектор распространения сейсмической волны, возникшей в результате землетрясения. Оцифрованные данные пересылаются на верхний уровень по технологии OPC (стандартный протокол, основу которого составляет DCOM, предназначен для обмена данными по промышленной сети Ethernet, используется большинством производителей, как аппаратуры, так и программ для обеспечения стандартного обмена данными между элементами системы).

Итак, мы имеем первичный преобразователь (трехкомпонентный датчик), сейсмостанцию (в приближении – это модуль АЦП + промышленный компьютер, обеспечивающий математическую обработку и передачу данных на верхний уровень по технологии OPC). Задача состоит в том, чтобы обработать сигнал в реальном времени или записать исходный сигнал, проанализировать его и однозначно определить наличие события (землетрясения).

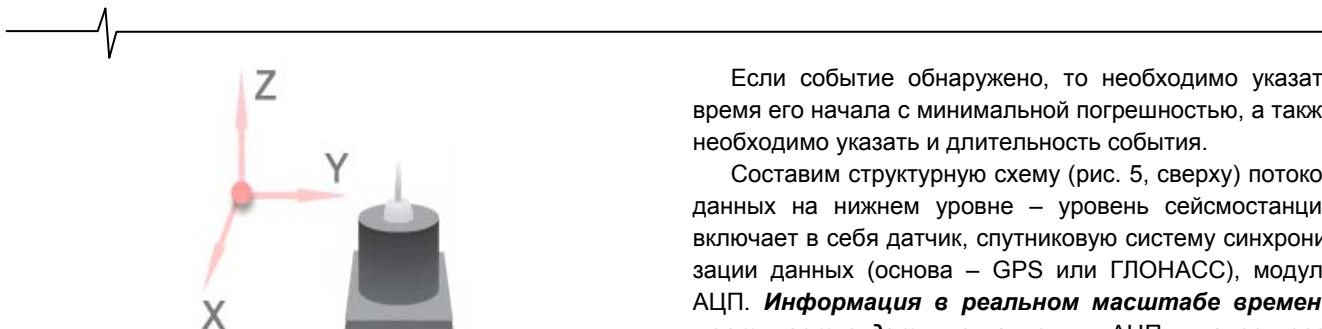


Рис. 4. Схематичное расположение измерительных осей X, Y, Z.

Если событие обнаружено, то необходимо указать время его начала с минимальной погрешностью, а также необходимо указать и длительность события.

Составим структурную схему (рис. 5, сверху) потоков данных на нижнем уровне – уровне сейсмостанции включает в себя датчик, спутниковую систему синхронизации данных (основа – GPS или ГЛОНАСС), модуль АЦП. **Информация в реальном масштабе времени поступает с датчика** на модуль АЦП и далее передается на промышленный компьютер, где **и обрабатывается проектируемым алгоритмом**.

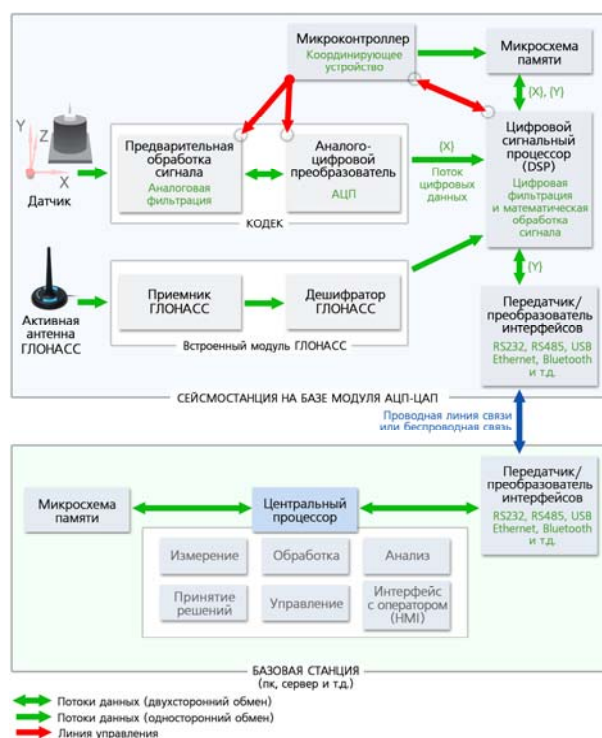


Рис. 5. Схема потоков данных. Источник информации – сейсмоматчик. Антенна ГЛОНАСС в составе спутниковой системы необходима для синхронизации данных между разными сейсмостанциями.

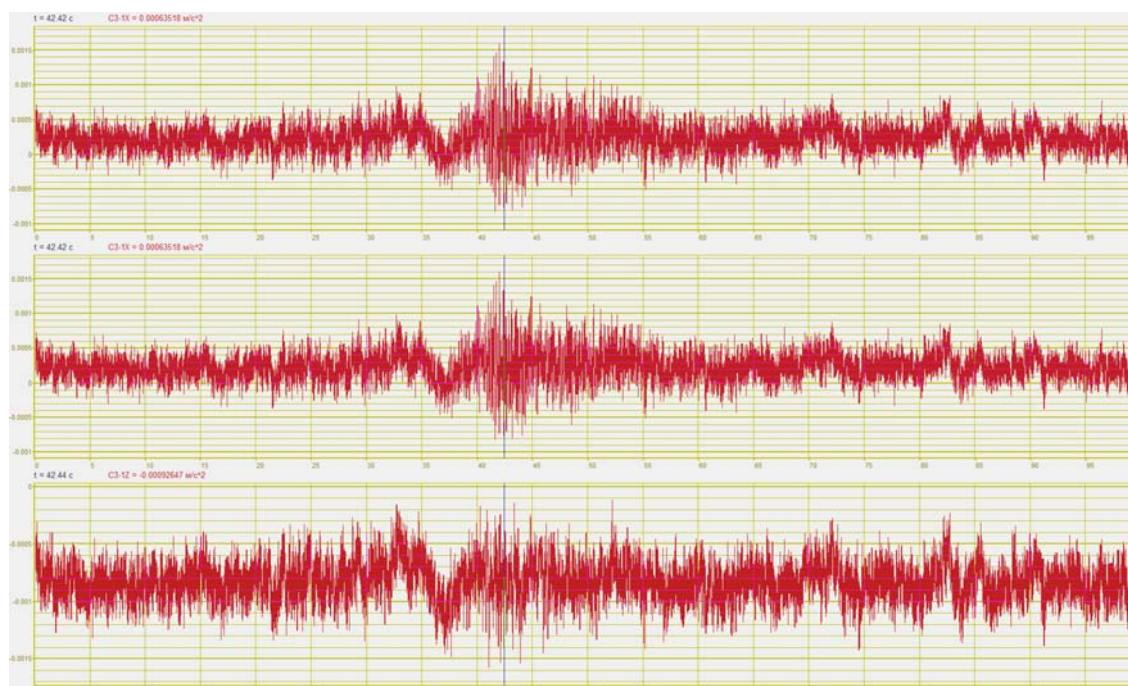


Рис. 6. Сейсмограммы. Компоненты одного из сейсмоматчиков: X-верхний, Y-средний, Z-нижний графики. Показания до полосовой фильтрации. Данные представлены в относительном времени.

Для первоначальной оценки параметров сигнала воспользуемся методом визуального анализом временной реализации данного сигнала, т.е. сейсмограммой (рис. 6) сто секундной записи. На рис. 6 представлены записи с трех компонент сверху вниз по порядку – ось X, Y и Z. Видно, что приблизительно на 40 секунде виден всплеск сигнала, (для справки, соответствует московскому времени 17:31 20 августа 2010 года). В качестве рабочей записи примем этот временной диапазон, и все математические операции по идентификации сейсмического сигнала будем проводить именно с этим сигналом. Отметим, что в окнах сейсмограмм по оси абсцисс используется относительное время, а не абсолютное.

Проанализируем шумовую составляющую записи, то есть ту часть, где заведомо не было полезного сигнала. На рис. 7 представлен результат спектрального анализа сигнала – график спектральной мощности шумов в децибелах (относительно опорного значения для расчета дБ, принятого в случае единиц измерения ускорения в м/с^2 , что составляет 0.0003 м/с^2) в зависимости от частоты.

Параметры расчета:

- метод расчета – дискретное преобразование Фурье;
- от 0.01 Гц до 40 Гц;
- частотное разрешение 0.01 Гц;
- изображен максимальный график за 100 секунд, усредненных по 5 секунд различных реализаций сигнала;

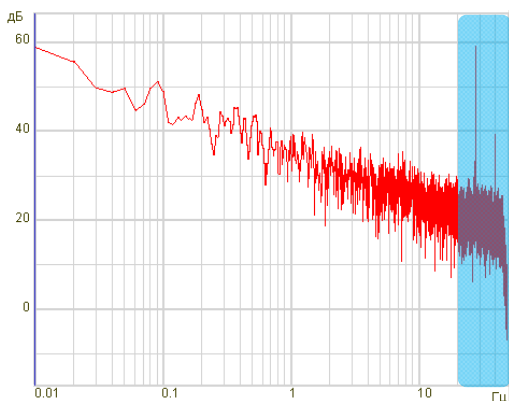


Рис. 7. Выделен высокочастотный участок (относительно полезной частоты в нашей задаче), в данной задаче является шумами.

На рис. 8 представлен более подробный график (за счет выбора иного частотного диапазона – в 10 раз меньше) со следующими параметрами:

- метод расчета – дискретное преобразование Фурье;
- от 0.01 Гц до 4 Гц;
- частотное разрешение 0.01 Гц;
- изображен максимальный график за 100 секунд, усредненных по 5 секунд различных реализаций сигнала;

Данные, на обоих рисунках, приведены в логарифмическом масштабе для того, что бы более подробно рассмотреть сигнал на низких частотах, являющихся информативными, и иметь общее представление о сигнале на высоких частотах, которые содержат шумы техногенного характера, и их необходимо отфильтровать.

Приняв во внимание то условие, что в нашей задаче техногенные шумы и шумы микросейсм являются “нежелательными” подвергнем сигнал полосовой фильтрации.

Произведем цифровую фильтрацию исходного сигнала, для этого сформируем полосовой фильтр со следующими параметрами по всем измерительным осям:

- ФВЧ 10 Гц;
- ФНЧ 1 Гц;

Фильтр реализуем с применением программы ZETLab\ZFormula, текст формулы, представлен на рис. 16. Результат работы полосового фильтра приведен на рис. 9 – спектральная мощность сигнала.

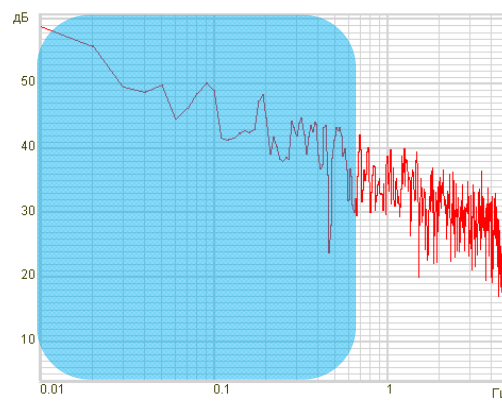


Рис. 8. Выделен низкочастотный участок (относительно полезной частоты в нашей задаче), в данной задаче является шумами, это микросейсм (шумы океанов, крупных озер и т.д. (4))

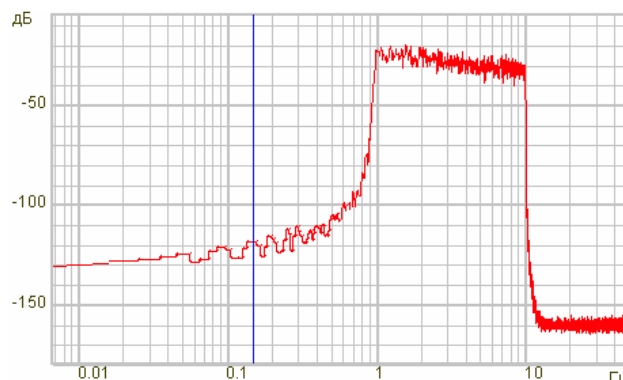


Рис. 9. Спектр шумовой составляющей сигнала по оси X (до события).

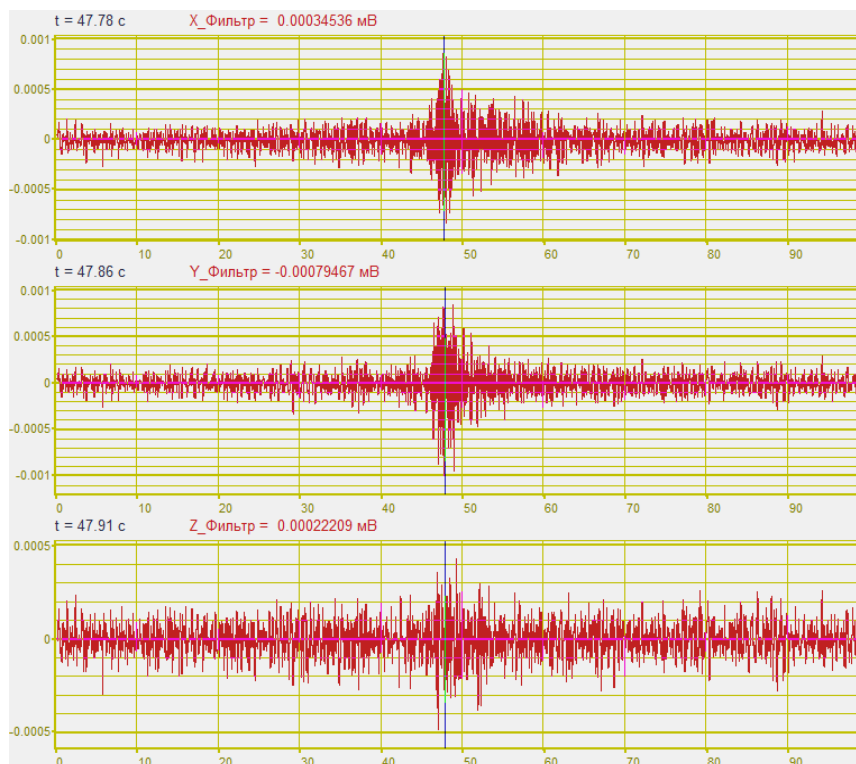
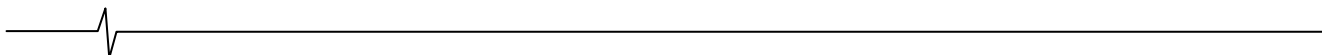


Рис. 10. Сейсмограммы. Компоненты одного из сейсмоматчиков: X-верхний, Y-средний, Z-нижний графики. Показания после полосовой фильтрации. Данные представлены в относительном времени.

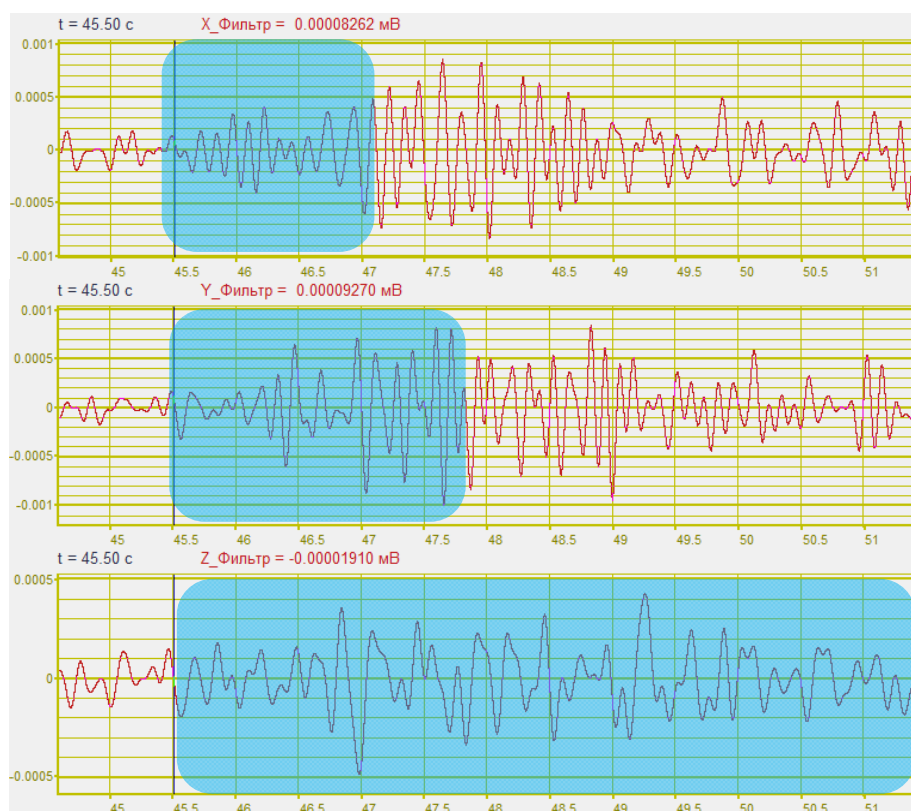


Рис. 11. Компоненты одного из сейсмоматчиков: X-верхний, Y-средний, Z-нижний графики. Увеличение масштаба по оси времени. Данные представлены в относительном времени. Зона неопределенности подсвечена голубой рамкой.

Сравнительным анализом временной реализации данных по осям X,Y и Z до и после проведения цифровой фильтрации в полосе 1-10 Гц (на рис. 6 и 10) виден существенный выигрыш – теперь факт наличия события отчетливо виден на сейсмограммах (рис. 10). Однако, момент начала события можно определить лишь с

большим приближением (рис. 11):

- $\pm 1-3$ секунд для показаний по оси X;
- $\pm 1-5$ секунд для показаний по оси Y;
- по оси Z факт наличия события невозможно определить (либо с погрешностью более 10 секунд);

После полосовой фильтрации соотношение сиг-

нал шум увеличилось, но все же начало события с точностью до нескольких отсчетов АЦП определить невозможно. Далее, предварительно отфильтрованный сигнал, обрабатываем методом анализа отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах – метод STA/LTA (STA/LTA – Short Time Average to Long Time Average). Впервые данный метод был описан в теоретической работе Фрейбергера. Эти методики требуют небольшого объема вычислений, что является существенным аргументом использования их в системах реального времени [6]. Результат работы алгоритма из статьи [6] приведен на рис. 12. Результат собственной реализации алгоритма представлен на рис. 13.

Приведем формулу расчета критерия STA/LTA:

$$STA(t) \setminus LTA(t) = \frac{MX[t_1]}{MX[t_2]},$$

где $t_1 < t_2$, MX – математическое ожидание амплитуды

сигнала за разное время наблюдения, например STA на участке 1 секунда, LTA на участке 10 секунд.

$$MX[t_1] = LTA(t) = \frac{1}{NS} \sum_{j=i}^{i+NS} \sqrt{x(jh)^2 + y(jh)^2 + z(jh)^2}$$

$$MX[t_2] = LTA(t) = \frac{1}{NL} \sum_{j=i-NL}^i \sqrt{x(jh)^2 + y(jh)^2 + z(jh)^2}$$

где $t = ih$ ($i=1,2,\dots$) – дискретное время, $1/h$ – частота дискретизации, NS и NL – число отсчетов в коротком и длинном временных окнах.

Временная сложность детектора STA/LTA равна $O(N)$, где N – число отсчетов анализируемой записи. Столь малая временная сложность объясняет широкое применение детектора в геофизических системах, функционирующих в реальном времени [6].

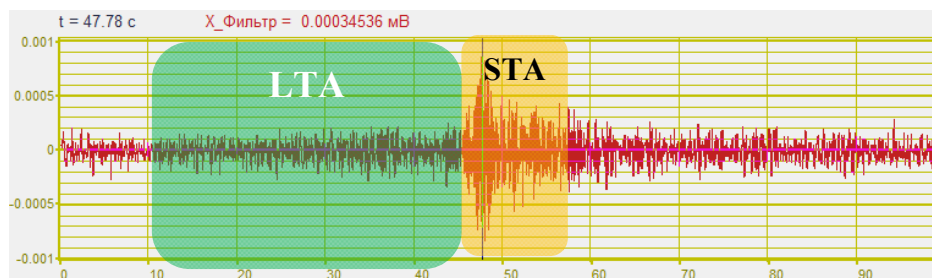


Рис. 12. Наглядная демонстрация алгоритма. Данные представлены в относительном времени.

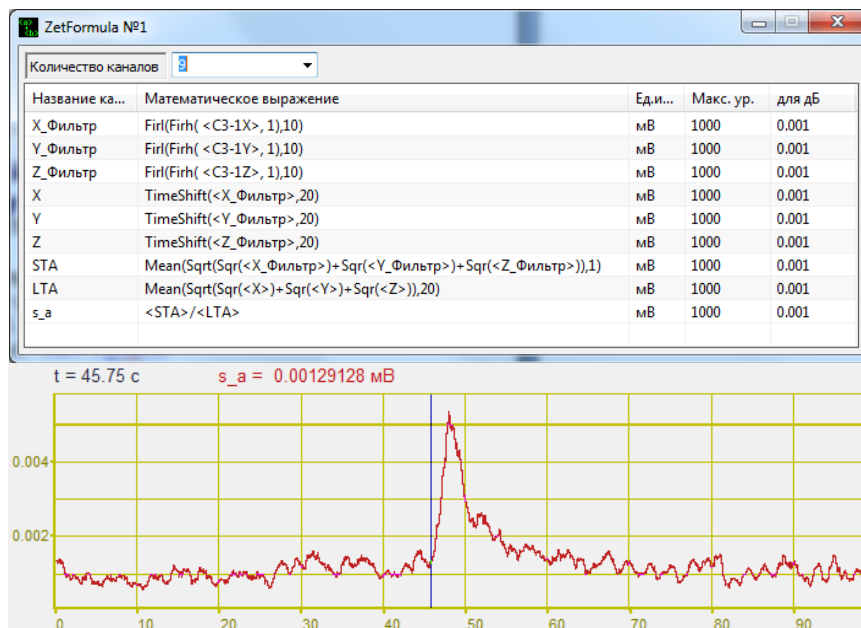


Рис. 13. результат работы программы STA/LTA. Данные представлены в относительном времени. Формула расчета выполнена на программном обеспечении ZETLab.

Как видно из рис. 13, четкость в определении времени начала достигнута. Теперь необходимо добиться автоматического детектирования начала события. В работе Фрейбергера сказано, что порог детектирования задается как константа.

Очевидны существенные недостатки такого алгоритма:

- возможны ложные срабатывания при низком значении пороговой линии для повышения точности работы;
- влияние межсезонных и суточных вариаций [4], тем самым может изменяться точность алгоритма во вре-

мени;

- при заранее высоком уровне порога снижение точности метода;

Как решение, устраняющее все вышеперечисленные недостатки, предлагаю использование адаптивного алгоритма обнаружения, когда порог подстраивается автоматически, в зависимости от статистических характеристик сигнала за время наблюдения NKL , где время предыстории сигнала $NKL > NL$ в K раз, то есть $NKL = NL \times K$.

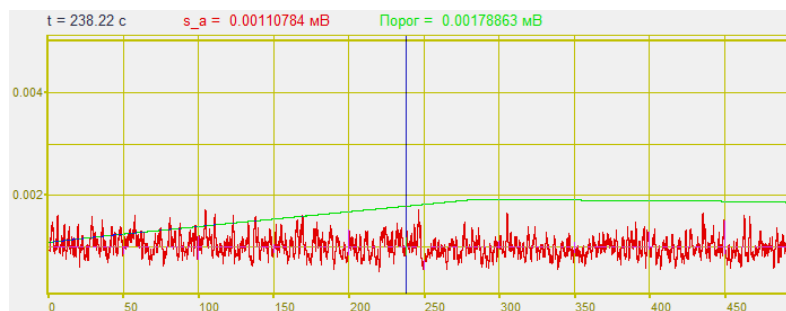


Рис. 14. Переходный процесс во время накопления статистики NKL. Зеленый график – порог, красный график – критерий STA/LTA. Данные представлены в относительном времени.

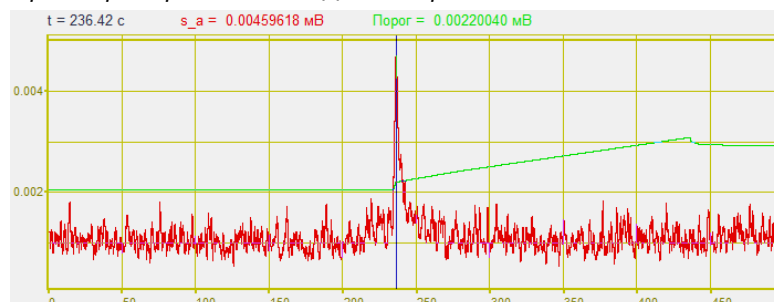


Рис. 15. Пересечение графика адаптивного порога срабатывания с графиком критерия STA/LTA. Данные представлены в относительном времени.

Название ка...	Математическое выражение	Ед.и...	Макс. ур.	для дБ
X_Фильтр	Firh(Firh(<C3-1X>, 1),10)	мВ	1000	0.001
Y_Фильтр	Firh(Firh(<C3-1Y>, 1),10)	мВ	1000	0.001
Z_Фильтр	Firh(Firh(<C3-1Z>, 1),10)	мВ	1000	0.001
X	TimeShift(<X_Фильтр>,20)	мВ	1000	0.001
Y	TimeShift(<Y_Фильтр>,20)	мВ	1000	0.001
Z	TimeShift(<Z_Фильтр>,20)	мВ	1000	0.001
STA	Mean(Sqrt(Sqr(<X_Фильтр>)+Sqr(<Y_Фильтр>)+Sqr(<Z_Фильтр>)),1)	мВ	1000	0.001
LTA	Mean(Sqrt(Sqr(<X>)+Sqr(<Y>)+Sqr(<Z>)),20)	мВ	1000	0.001
s_a	<STA>/<LTA>	мВ	1000	0.001
Порог	Mean(Max(<s_a>, 200),600)+Mean(Max(<s_a>, 50),200)*0.05	мВ	1000	0.001

Рис. 161. Формула, реализующая алгоритм адаптации порога срабатывания. Формула расчета выполнена на программном обеспечении ZETLab.

В заключение отметим, что предложенный метод адаптации детектора STA/LTA позволяет автоматически определять участок сейсмограммы, что обеспечивает высокую точность в определении момента вступления волн. Математический аппарат ZETLab дает возможность настраивать систему в кратчайшие сроки, позволяя изменять различные параметры алгоритма во время системы, без реконфигурации работы аппаратной части и остальных программ комплекса программ. Стоит отметить, что адаптация алгоритма STA/LTA с высокой точностью результата может применяться в условиях плавно нарастающего фронта сигнала и в условиях сезонных вариаций фонового шума. Так же, данный метод может быть применен и в прикладных областях, где необходимо определение момента вступления волн, например, при работе с датчиками акустической эмиссии, в методах неразрушающего контроля.

Предложенный алгоритм, выполненный с применением программно-аппаратного комплекса ZETLab, может быть полезен инженерам в реализации специализированной техники, необходимой для обнаружения события в сигнале на фоне посторонних шумов. А система в целом предоставляет данные специалистам в области сейсмологии и смежных научных областях, дает возможность принять

решение о размещении тех или иных объектов или проведении различных работ в определенной местности.

Литературы

1. Д.Н.Ушаков. Толковый словарь русского языка. Москва : Гос. ин-т "Сов. энцикл."; ОГИЗ; Гос. изд-во иностр. и нац. слов., 1935-1940.
2. Интернет-энциклопедия. Землетрясение. ru.wikipedia.org. [В Интернете] [Цитировано: 18 08 2010 г.] <http://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясение>.
3. МЧС. www.spas-extreme.ru. Интернет-портал МЧС. [В Интернете] [Цитировано: 18 08 2010 г.] <http://www.spas-extreme.ru/schoolsafety/prirodchs/zemletrysenie/russia.php>.
4. О.К.Кедров Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Москва, Саранск : Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта; Рос. Акад. Наук, 2005.
5. статья "Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB". А.Б.Сергиенко б.м. : Математика в приложениях, №1 2003 г.
6. Автоматическое определение длительности сейсмического события в режиме реального времени. С.В.Баранов Москва : Сборник статей аспирантов, соискателей, докторантов и научных работников, №3 2004 г.