

На правах рукописи



ЕГОШКИН Николай Анатольевич

**МЕТОДЫ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ ОТ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ) в НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон»)

Научный консультант: **Еремеев Виктор Владимирович**
доктор технических наук,
директор НИИ обработки аэрокосмических изображений РГРТУ

Официальные оппоненты: **Барталев Сергей Александрович**
д.т.н, главный научный сотрудник, зав. лабораторией спутникового мониторинга наземных экосистем ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (г. Москва)

Сергеев Владислав Викторович
д.т.н., директор Института информатики, математики и электроники, зав. кафедрой геоинформатики и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара)

Ташлинский Александр Григорьевич
д.т.н, зав. кафедрой «Радиотехника» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (г. Ульяновск)

Ведущая организация: **ФГУП ЦНИИмаш** (г. Королев)

Защита состоится **6 ноября 2019 года в 12:00** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в РГРТУ по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ и на сайте РГРТУ: <http://www.rsreu.ru>

Автореферат разослан _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
д-р техн. наук



**Прузков Александр
Викторович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) имеют важное значение для народного хозяйства и обороноспособности страны. В настоящее время созданы и активно развиваются различные по характеристикам и принципам функционирования системы ДЗЗ. Федеральная космическая программа на 2016-2025 годы предусматривает увеличение количества действующих спутников наблюдения Земли с 8 до 23. Планируется создание и совершенствование систем ДЗЗ: высокого и среднего разрешения, глобального наблюдения Земли, тепловых, радиолокационных и гиперспектральных. Разрабатывается уникальная система «Арктика-М» для наблюдения с высокой эллиптической орбиты за стратегически важным для России арктическим регионом. В рамках государственных оборонных заказов активно ведутся работы по созданию космических систем ДЗЗ специального назначения.

В системах ДЗЗ общепринято выделять космический и наземный сегменты. Космический сегмент – это сам космический аппарат (КА) с различными бортовыми системами, в том числе средствами наблюдения Земли и навигационной аппаратурой. Бортовые системы во многом определяют качество изображений от системы ДЗЗ. Наземный сегмент включает средства приёма, обработки и распространения информации. От него также существенно зависит качество выходных информационных продуктов. Первоочередная задача наземной обработки данных ДЗЗ – это адекватное описание характеристик объектов наблюдаемой сцены.

В последние годы рядом стран созданы принципиально новые системы ДЗЗ: высокодетальные (с разрешением до 0.3 м), гиперспектральные (десятки и сотни каналов видимого и инфракрасного излучения), радиолокационные, глобального наблюдения Земли. Россия несколько отстаёт в области создания современных систем ДЗЗ. Сказываются последствия низкого финансирования НИОКР в данном направлении в 90-х годах прошлого столетия, приведшие к отставанию в области создания оптоэлектронной элементной базы и средств наземных испытаний съёмочной аппаратуры. Сегодня эта ситуация усугубляется санкциями зарубежных стран на поставку в Россию современной оптоэлектронной элементной базы. Для восстановления паритета России в области ДЗЗ в настоящее время активно ведутся работы по созданию принципиально новых конструкций систем наблюдения Земли с использованием отечественной элементной базы. Планируется для различных типов систем ДЗЗ достичь мирового уровня качества съёмки, а по ряду показателей превзойти его. В связи с этим возникает необходимость создания математических моделей построения и функционирования таких систем. Особое значение приобретает разработка новых прорывных подходов к обработке информации от отечественных систем ДЗЗ, позволяющих получить высококачественные изображения с использованием аппаратуры, построенной исключительно на отечественной элементной базе.

Одной из основных функций наземного сегмента систем ДЗЗ является геометрическая обработка изображений, нацеленная на получение снимков, геометрически подобных наблюдаемой сцене. Необходимо с максимально воз-

можной точностью установить соответствие между координатами одноименных объектов на снимках и на поверхности Земли. Это позволяет различным потребителям получать достоверную информацию о координатах, углах, длинах, площадях и других характеристиках наблюдаемых объектов.

Геометрическое качество обработки характеризуется невязками между координатами одноименных объектов на изображении и наблюдаемой сцене. Формирование космических изображений с высоким пространственным разрешением, малыми внутрикадровыми искажениями и высокой точностью определения координат объектов земной поверхности является приоритетным направлением развития современных систем ДЗЗ. Геометрическая обработка является одной из основных и наиболее трудоёмких операций наземного сегмента.

Таким образом, проблема высокоточной геометрической обработки информации от современных систем ДЗЗ является актуальной и требует проведения новых научных исследований. В диссертационной работе дается теоретическое обобщение и решение крупной научно-технической проблемы, связанной с созданием методов высокоточной геометрической обработки изображений от современных систем ДЗЗ, осуществляющих съёмку Земли в видимом, тепловом и радио диапазонах спектра с различными пространственным и спектральным разрешением (высокодетальное, обзорное, глобальное и гиперспектральное наблюдение). Эта проблема имеет важное государственное значение, поскольку нацелена на эффективное использование материалов космической съёмки на федеральном, региональном и отраслевом уровнях.

Степень разработанности темы. Сегодня в мире созданы и проектируются системы ДЗЗ самого различного принципа действия и целевого назначения. В рамках конкретных систем ДЗЗ создаются наземные центры приёма, обработки и распространения данных для различных потребителей. В этих центрах важная роль отводится геометрической обработке информации. Эта весьма сложная и ресурсоёмкая операция во многом определяет геометрическое качество выходных информационных продуктов (снимков).

В России созданием космических систем ДЗЗ занимаются известные предприятия ракетно-космической промышленности: Самарский Ракетно-космический центр «Прогресс» (высокодетальные оптические системы «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Аист-2Д», радиолокационная система «Обзор-Р», системы специального назначения); НПО им. С. А. Лавочкина (системы глобального наблюдения Земли «Электро-Л», «Арктика-М»); корпорация «ВНИИЭМ» (гидрометеорологические спутники «Метеор-М», системы «Канопус-В» и «Канопус-В-ИК»); НПО машиностроения (радиолокационная система «Кондор»); корпорация «Энергия» (системы наблюдения с международной космической станции); АО «Российские космические системы» и входящий в него Научный центр оперативного мониторинга Земли, НИИ точных приборов и др.

Вопросами наземной обработки информации помимо указанных организаций активно занимаются НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Институт космических исследований РАН, Институт систем обработки изображений РАН, ЦНИИ машиностроения, Самарский университет им. академика С. П. Королёва, МГУ,

МФТИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ, ЮЗГУ, УлГТУ, РГРТУ, Госцентр «Природа», организации различных отраслей и ведомств (в том числе Министерства обороны РФ).

Зарубежными лидерами в области создания систем ДЗЗ и обработки поступающей от них информации являются фирмы Lockheed Martin, GeoEye, DigitalGlobe, Ball Aerospace (США), Airbus Defence & Space, Spot Image (Евросоюз), а также национальные и совместные предприятия Индии, Китая, Кореи, Японии, Израиля, Испании, Италии, Франции, Германии, Канады.

Работы отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области геометрической обработки изображений служат базой для решения задач, поставленных в диссертации. Вместе с тем при создании каждой системы ДЗЗ с новыми конструкциями датчиков возникает необходимость в разработке новых математических моделей их функционирования и методов обработки материалов съёмки. Здесь необходимо выделить ряд перспективных, ещё мало исследованных научных направлений:

- уточнение навигационных данных и моделей съёмки по опорной информации с учетом анализа фактических погрешностей измерительной аппаратуры;
- организация идентификации на изображениях опорных объектов с учетом условий съёмки и особенностей наблюдаемой сцены;
- определение рельефа местности на основе фазовой информации радиолокационных изображений для повышения точности геодезической привязки локационных и оптических изображений;
- повышение качества изображений (особенно тепловизионных) за счет коррекции смаза и расфокусировки и методов неравномерной дискретизации;
- обеспечение идентичности координатно-яркостных характеристик изображений от различных спектральных каналов гиперспектральной съёмки.

Известные за рубежом решения по геометрической обработке изображений во многом основаны на качестве и стабильности съёмочной и навигационной аппаратуры, которые определяются технологическим уровнем производства. Так, системы ДЗЗ «Плеяды» (Франция) и WorldView-3 (США) обеспечивают точность определения координат объектов ~4 м без использования опорных точек местности. Российский технологический уровень пока не обеспечивает необходимую стабильность характеристик аппаратуры и её улучшение в ходе наземных испытаний. Поэтому возникает необходимость в создании математических, технологических и других подходов к обработке информации ДЗЗ с учетом существующих погрешностей и нестабильностей отечественной аппаратуры.

Известны методы коррекции нестабильностей геометрических характеристик изображений на основе идентификации опорных ориентиров. Однако сами методы идентификации являются эвристическими и имеют узкое применение для конкретных систем ДЗЗ и условий съёмки. Создание новых систем ДЗЗ заведомо требует разработки соответствующих методов идентификации опорных ориентиров. Подходы к оцениванию рельефа по радиолокационным изображениям (интерферометрия) также являются эвристическими. В последние годы

стала доступна априорная информация о рельефе, но методы её использования для улучшения интерферометрии не разработаны.

Известны методы фильтрации навигационных измерений для увеличения их точности, основанные на предсказуемости изменения положения и ориентации спутника во времени. Однако параметры поведения во времени ошибок и измеряемых величин обычно не известны, поэтому алгоритмы фильтрации эвристически подбираются для каждой конкретной системы ДЗЗ. Аналогичная проблема имеет место при использовании наземных опорных ориентиров для уточнения геометрии съёмки. Известные подходы к геодезической привязке и трансформации изображений не позволяют адекватно описывать и корректировать высокочастотные (ВЧ) искажения снимков.

Значительное внимание за рубежом уделяется оцениванию функции рассеяния точки (ФРТ) съёмочной аппаратуры, позволяющей описать даже незначительный смаз и расфокусировку изображений. В России для некоторых съёмочных систем значительные размеры ФРТ (пиксель и более) вызваны нештатным режимом работы систем управления движением и непрогнозируемыми деформациями фокальной плоскости оптических систем при запуске и эксплуатации КА. При этом ФРТ зависит от реализации геометрии съёмки, в результате известные алгоритмы оценивания и коррекции ФРТ оказываются неприменимыми. Недостаточно раскрыты в публикациях вопросы высокоточного выравнивания ФРТ в различных каналах гиперспектральной аппаратуры.

За рубежом хорошо развита оптоэлектронная база, особенно для теплового инфракрасного (ИК) диапазона. Для тепловизионной съёмки там разработаны высокочувствительные линейки, включающие более тысячи фотоприемников (1500 в LandSat-8, 2013 год). В России доступны только линейки фотоприемников малой размерности (до 192), которые группируются в сборки для обеспечения приемлемого качества изображений. Аналогичные подходы применялись за рубежом в спутниках предыдущих поколений, однако известные методы обработки данных для повышения качества устарели и не обеспечивают выполнения требований современных потребителей. Известны более общие и трудоёмкие подходы к повышению качества на основе техники сверхразрешения, однако они фактически не пригодны для высокоинформативных космических изображений.

Цель диссертации состоит в разработке новых методов высокоточной геометрической обработки информации от современных систем космического зондирования Земли, построенных на российской оптоэлектронной базе. Эти методы составляют теоретическую и методическую основу для создания наземных средств обработки для федеральных, отраслевых и региональных обрабатывающих центров России, в том числе в интересах Министерства обороны.

Задачи. Поставленная цель достигается путем решения следующих основных задач:

- системный анализ проблемы геометрической обработки информации в современных системах ДЗЗ и выбор концептуальных направлений по совершенствованию методов обработки;

- создание методов обработки навигационной и другой бортовой измерительной информации для повышения точности знания скорости, координат, угловой ориентации КА и параметров формирования изображений как функций времени;

- разработка методических основ высокоточной координатной обработки на основе теории идентификации динамических моделей съёмки по опорной информации;

- разработка методов идентификации опорных объектов для систем глобального наблюдения Земли, применимых при предполетной и полетной калибровке аппаратуры с двухкоординатной разверткой, а также на протяжении всего жизненного цикла космической системы;

- разработка методов интерферометрической обработки радиолокационных изображений для уточнения трехмерного рельефа местности и повышения качества геометрической обработки;

- разработка методов повышения и выравнивания пространственного разрешения изображений при наличии расфокусировки и скоростного смаза в условиях геометрических искажений сканерной съёмки;

- разработка методов объединения информации от субпиксельно смещенных линеек фотоприёмников для повышения пространственного и радиометрического разрешения съёмки.

Научная новизна. В диссертационной работе дается теоретическое обобщение и систематизированное решение *научной проблемы* высокоточной геометрической обработки данных от современных систем ДЗЗ, *имеющей важное значение* для геоинформационного обеспечения России на федеральном, отраслевом и региональном уровнях. Научная новизна выносимых на защиту положений предопределяется, главным образом, тремя обстоятельствами.

Во-первых, в настоящее время в стране отрасль космического ДЗЗ бурно развивается, появляются космические системы новых типов (глобального наблюдения, радиолокационные, гиперспектральные, высокодетальные), новые унифицированные спутниковые платформы и новая съёмочная аппаратура. Всё это порождает необходимость в решении новых задач анализа и обработки информации для создания стандартных принятых в международной практике информационных продуктов.

Во-вторых, рост вычислительной эффективности средств обработки позволяет повсеместно внедрять сложные и полностью автоматические методы поиска характерных объектов на изображениях и использовать полученную опорную информацию для улучшения качества геометрической обработки как при наземной калибровке съёмочной аппаратуры, так и в ходе её эксплуатации на орбите.

В-третьих, в условиях «импортозамещения» российские производители аппаратуры ДЗЗ вынуждены ориентироваться на отечественную элементную базу. Это требует разработки специальных методов повышения качества изображений для достижения мирового уровня тактико-технических характеристик проектируемых систем ДЗЗ.

Конкретно на защиту выносятся следующие новые научные положения и результаты.

1. Метод повышения точности навигационной информации спутника, основанный на предсказании навигационных измерений и идентификации динамической модели коррелированности ошибок и позволяющий повысить точность оценивания координат КА для систем высокодетальной съёмки в ~ 6 раз в плане и в ~ 16 раз по высоте, угловой ориентации в ~ 2.7 раза.

2. Метод повышения точности координатной обработки космических изображений на основе идентификации динамических моделей съёмки по опорной информации, который позволяет адекватно описать процесс формирования и коррекции изображений при наличии различного рода коррелированных ошибок.

3. Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных от систем глобального наблюдения Земли на фоне окружающего космоса, основанное на идентификации характерных объектов наблюдаемой сцены и позволяющее повысить точность координатной обработки до 0.2-0.5 пикселя (элемента пространственного разрешения).

4. Метод высокоточного определения рельефа местности для систем радиолокационного наблюдения Земли, основанный на интерферометрической обработке пар изображений с привлечением низкодетального опорного рельефа от других систем ДЗЗ и позволяющий в среднем в 5 раз повысить точность определения высоты и соответственно точность определения координат объектов.

5. Метод пространственного и частотного объединения информации от $K \geq 2$ субпиксельно смещенных линеек фотоприёмников на основе теории неравномерной дискретизации, позволяющий в условиях реальных геометрических искажений повысить пространственное разрешение снимков до K раз.

6. Метод коррекции смаза и расфокусировки изображений, основанный на аналитических моделях съёмки и анализе пар изображений одной и той же сцены, позволяющий без трудоёмкой операции оценки функции рассеяния точки выровнять разрешение в различных каналах гиперспектральной аппаратуры и повысить разрешение существенно «смазанных» изображений до 16 раз.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что в ней выполнен системный анализ проблемы геометрической обработки, предложены и исследованы новые методы высокоточной обработки и анализа изображений от современных систем ДЗЗ и на этой основе создана серия программных комплексов, которые получили эффективное внедрение на практике.

Методы исследования. Теоретические результаты получены с использованием методов системного анализа, цифровой обработки изображений, оптимизации, линейной алгебры, математической статистики, теории динамических систем и графов.

Соответствие паспорту специальности 05.13.01. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)» в части:

– пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;

– пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;

– пункта 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Реализация и внедрение. Диссертационная работа включает исследования, выполненные в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках создания и эксплуатации космических систем ДЗЗ «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Электро-Л», «Арктика-М», «Обзор-Р», определенных Федеральными космическими программами на 2006 - 2015 и 2016 - 2025 годы. При создании наземных средств обработки данных ДЗЗ в рамках указанных систем соискатель принял участие в выполнении более 15 ОКР по заказам предприятий ракетно-космической промышленности. Результаты диссертационной работы в виде ряда программных комплексов получили эффективное внедрение, что подтверждается Актами внедрения (использования) от:

- Государственной корпорации «Роскосмос»,
- АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»,
- АО «НПО Лавочкина»,
- АО «Российские космические системы»,

которые приведены в приложении к диссертации.

Апробация работы. По основным положениям и результатам исследований диссертации сделаны доклады:

– на международных конференциях «International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering» (Москва, 2015), «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences» (Чехия, 2016), «Image and Signal Processing for Remote Sensing» (Берлин, 2018), «Гагаринские чтения» (Москва, 2010), «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2010, 2015), «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (Москва, 2016, 2017), «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015), «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2007, 2013, 2017);

– на всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2005, 2008, 2014, 2015, 2016), «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2011, 2015), «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2009, 2010, 2012, 2015), «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2008, 2009, 2014, 2015, 2016, 2017), «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула, 2007).

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата, математическим и имитационным моделированием, экспериментальными исследованиями, сопоставлением альтернативных подходов, практическим внедрением и штатной эксплуатацией спроектированных комплексов обработки информации от спутников «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Электро-Л» и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 96 работ:

- 30 статей (28 по списку ВАК, в их числе 6 индексируемых в базах Scopus и Web of Science);
- 2 коллективные монографии;
- 2 патента на изобретения;
- 11 свидетельств на программы для ЭВМ;
- 51 тезис докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и приложения. Ее объем составляет 323 с., в том числе 228 с. – основное содержание, 48 с. – рисунки и таблицы, 40 с. – список литературы, 7 с. – приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ проблемы геометрической обработки информации в современных системах космического зондирования Земли

Изучены системные связи и принципы функционирования современных космических систем ДЗЗ. Выполнен анализ задач геометрической обработки, состоящей в получении по исходным искаженным снимкам новых изображений, представленных в картографических проекциях и форматах, принятых в международной практике. Формализованы базовые математические модели формирования и геометрической обработки оптических, тепловизионных и радиолокационных спутниковых изображений. Выявлена необходимость проведения новых научных исследований по следующим направлениям.

Первое направление – это повышение точности измерительной навигационной информации о положении и ориентации спутника и сканирующих элементов съемочной системы. Анализ показал, что на борту спутника функционирует ряд навигационных датчиков (звёздные датчики, измерители углов, ГЛОНАСС, гироскопы и др.). По ряду причин возможности высокоточной обработки этой измерительной информации на борту спутника ограничены. Поэтому целесообразна передача этой информации на Землю для последующей обработки.

Известные алгоритмы повышения точности навигационных измерений основаны на плавности их изменения и реализуются сглаживающей фильтрацией. Параметры такого сглаживания подбираются авторами алгоритмов интуитивно, исходя из наблюдаемой динамики поведения фильтруемой величины в конкретной системе ДЗЗ. Однако оптимальные параметры фильтрации должны соответствовать реальному поведению системы, которое известно не точно. Ошибки измерений также могут быть коррелированы во времени.

В этой связи представляется актуальным исследование методов идентификации динамических систем для уточнения динамических моделей измеряемых величин и шумов с точки зрения максимального повышения точности навигационных измерений. Такой подход развит в главе 2 диссертации, пп. 2.2-2.4.

Второе направление – это использование идентификации динамических моделей опорной информации для повышения точности геометрической обработки. Опорные точки представляют собой новую измерительную информацию, которую необходимо оптимально использовать для повышения точности геометрических моделей. Показано, что известные аналитические методы эффективны при калибровке постоянных параметров съёмочной системы. Регрессионные методы эффективны для коррекции остаточных флуктуаций геометрии. Однако класс функций регрессии обычно выбирается интуитивно разработчиками алгоритмов в зависимости от конкретной съёмочной системы и наблюдаемых искажений (дрейф, колебания и т.п.). Установлено, что флуктуации геометрии имеют вполне определенную физическую природу: они порождаются колебательными процессами в системах автоматического регулирования спутниковой платформы. Отличительная черта этих флуктуаций – коррелированность во времени. Например, установлено, что ошибки навигационных измерений от ГЛОНАСС сильно коррелированы во времени.

Эффективный подход к описанию и учету временной коррелированности ошибок даёт теория динамических систем. Так, линейное и угловое движение КА инерционно и описывается физическими динамическими моделями. Однако точное выявление причин коррелированности ошибок не всегда возможно. Показана перспективность подхода к уточнению геометрических моделей на основе теории идентификации динамических систем. При этом в ходе жизненного цикла системы ДЗЗ по опорной информации уточняются динамические описания погрешностей, и далее на этой основе может быть повышена точность геометрической коррекции. Также идентификация динамической системы целесообразна для разработки вычислительно эффективных алгоритмов геометрической коррекции средне- и высокочастотных флуктуаций. Исследования по второму направлению выполнены в главе 2 диссертации, пп. 2.5, 2.6.

Третье направление связано с автоматизацией получения и использования опорной информации для систем глобального наблюдения Земли. Как показывает анализ, эта задача имеет ряд особенностей по сравнению с известными решениями для низкоорбитальных спутников. Наиболее известны геостационарные системы: спутник «зависает» в плоскости экватора над заданной точкой Земли на высоте ~35000 км. Это позволяет каждые 5-30 минут получать изображения диска Земли на фоне окружающего космоса. Для России важна съёмка не только экваториальных, но и полярных областей. Это потребовало создания уникальной высокоэллиптической системы «Арктика-М», в которой высота при съёмке изменяется от 27000 до 39000 км.

Датчики для глобального наблюдения Земли принципиально должны иметь двухкоординатную развертку и широкое поле зрения. Это требует применения сканирующих систем развертки и формирования изображения частями – сканами. При этом закон развертки может быть исключительно сложен, что требует калибровки съёмочной аппаратуры по значительному числу опорных точек. Специалистами АО «Российские космические системы» создан эталонный объект из регулярно расположенных с точностью ~1 мкм отверстий и калибровочный стенд. Возникла необходимость в разработке автоматической

технологии распознавания отверстий, поскольку известные методы неприменимы ввиду периодичности автокорреляционной функции объекта и скановой структуры изображений.

После запуска спутника возникает необходимость уточнения геометрических моделей съёмки по наземным ориентирам. Анализ показал, что для этого невозможно использование наземных калибровочных полигонов, а в качестве ориентиров следует привлекать контурные точки диска Земли и карты береговых линий. Идентификация этих объектов требует учета специфики, связанной с условиями глобального наблюдения Земли, особенно при съёмке с высокой эллиптической орбиты при мешающем действии облачности. Исследования по третьему направлению представлены в главе 3 диссертации.

Четвертое направление – повышение точности геометрической обработки за счет уточнения рельефа местности на основе сопоставления пар радиолокационных изображений, полученных из различных точек пространства. Радиолокатор является одним из наиболее точных приборов для дистанционного измерения координат объектов на земной поверхности, поскольку на качество геометрической обработки изображений мало влияют ошибки измерения ориентации спутника и другие случайные факторы. Основным плохо предсказуемым фактором оказывается рельеф местности. Если в оптических системах возможна съёмка в надир, при которой влияние рельефа минимально, то для локатора бокового обзора именно рельеф ограничивает точность определения координат объектов.

В то же время совместный анализ пар изображений позволяет определять трехмерные координаты объектов. Для этого наиболее предпочтителен режим интерферометрической обработки, при котором высота объектов извлекается из фазовой информации. Наиболее проблемным этапом интерферометрии является развертывания фазы. Это некорректно поставленная задача, поэтому существующие алгоритмы её решения основаны на различных эвристических предположениях о плавности изменения рельефа и часто дают значительные ошибки.

В настоящее время доступны весьма качественные цифровые модели рельефа низкого разрешения, полученные различными системами ДЗЗ. Эта априорная информация о рельефе может позволить радикально улучшить качество развертки фазы и оценки рельефа. Такой подход развит в главе 4 диссертации.

Пятое направление – повышение пространственного и радиометрического разрешения съёмки за счет использования нескольких субпиксельно смещенных линеек фотоприёмников. Как уже отмечалось, за рубежом используются линейки фотоприёмников с высокой размерностью и чувствительностью. Отечественная промышленность изготавливает сборки из нескольких линеек с более низкой размерностью, но с субпиксельными смещениями для повышения пространственного и радиометрического качества изображений.

При обработке информации от датчиков, построенных на сборках линеек, в условиях геометрических искажений сцены возникает необходимость в решении ряда новых задач. Общие подходы, основанные на идее сверхразрешения, слишком трудоёмки для обработки высокоинформативных космических изображений и не обеспечивают быстрой адаптации к изменениям геометрии

съёмки. Показано, что на основе теории неравномерной дискретизации можно получить оптимальное объединение информации от субпиксельно смещенных изображений. Данный подход развит в главе 5 диссертации, пп. 5.1-5.3.

Шестое направление – коррекция смаза и расфокусировки изображений для повышения пространственного разрешения. Показано, что в современных системах ДЗЗ смаз изображений возникает при съёмке в режиме временной задержки и накопления заряда из-за нарушения точного соответствия между направлением и скоростью бега изображения в фокальной плоскости датчика и частотой опроса матриц. При нештатной работе бортовой аппаратуры смаз может достигать нескольких пикселей и значительно ухудшать геометрическое качество изображений. Расфокусировка изображений возникает при расстройке оптической системы из-за перегрузок в ходе запуска КА. При этом в ряде систем подстройка фокусировки после запуска КА не предусмотрена. Кроме того, разные оптоэлектронные блоки современных датчиков (например, гиперспектральных) могут иметь различные ФРТ в силу разных принципов построения. При этом для потребителей важно иметь гиперспектральную информацию с идентичной для разных каналов ФРТ.

Известные методы коррекции смаза и расфокусировки плохо применимы для обработки космических изображений. Это связано с исключительно большими объемами изображений, их скановой структурой и наличием геометрических искажений, приводящих к изменению ФРТ в пределах изображения. Показано, что в этих условиях наиболее перспективен подход к коррекции смаза и расфокусировки на основе прогнозирования изменения ФРТ по геометрической модели съёмки. Также для выравнивания ФРТ у различных датчиков съёмочной аппаратуры возможен совместный анализ изображений, не требующий трудоёмкого оценивания ФРТ. Эти подходы развиты в главе 5 диссертации, пп. 5.4, 5.5.

Таким образом, выполненный системный анализ проблемы высокоточной геометрической обработки информации от современных космических систем ДЗЗ определил необходимость в проведении новых научных исследований и разработок по целому ряду тематических направлений. Эти исследования и составляют содержание диссертации, а их основные результаты выносятся на защиту.

Глава 2. Методы повышения точности координатной обработки космических изображений на основе идентификации динамических моделей съёмки Земли

В этой главе выдвигаются и обосновываются два первых положения, выносимые на защиту (см. с. 6). В их основу положена идея уточнения временных корреляций измеряемых величин и их ошибок. Результаты этой главы в равной степени относятся к системам ДЗЗ самого различного назначения (видимого, теплового и радиолокационного диапазонов спектра; высокодетального, обзорного и глобального наблюдения).

Первое положение касается метода повышения точности навигационной информации спутника на основе предсказания навигационных измерений и идентификации динамической модели коррелированности ошибок.

Для повышения точности знания информации о положении спутника используется избыточное во времени число измерений в сочетании с хорошей предсказуемостью движения центра масс (ЦМ) КА по орбите, которая описывается функцией $\Theta(\Omega, t)$ предсказания вектора координат и скоростей Θ на произвольный момент времени t при заданных параметрах орбиты Ω . Высокоточное оценивание Ω осуществляется из условия

$$\sum_i (\Theta(\Omega, t_i) - \mathbf{I}(t_i))^T \mathbf{K}_i^{-1} (\Theta(\Omega, t_i) - \mathbf{I}(t_i)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\mathbf{I}(t_i)$ – измерения координат и скоростей в моменты времени t_i , \mathbf{K}_i – ковариационная матрица ошибок измерений. В результате находится орбита, максимально близкая к измерениям $\mathbf{I}(t_i)$.

Для увеличения точности оперативного решения предлагается воспользоваться эталонным высокоточным решением навигационной задачи $\mathbf{I}^g(t_i)$, полученным пост-обработкой фазовых измерений ГЛОНАСС. Для этого вначале осуществляется переход в орбитальную систему координат (ОСК): $\mathbf{e}_i = \mathbf{M}_{\text{оск} \rightarrow \text{гск}}^T(t_i) (\mathbf{I}(t_i) - \mathbf{I}^g(t_i))$. Обоснована стационарность ошибок в ОСК, поэтому их ковариация определяется как $\hat{\mathbf{K}} = \sum_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^T / \sum_i 1$. В (1) для последующих

оперативных расчетов используются $\mathbf{K}_i = \mathbf{M}_{\text{оск} \rightarrow \text{гск}}^T(t_i) \hat{\mathbf{K}} \mathbf{M}_{\text{оск} \rightarrow \text{гск}}(t_i)$. Для компенсации эффекта коррелированности ошибок во времени вводится «обеляющий» фильтр, для чего строится предсказатель $\mathbf{p}_i = \Psi \mathbf{e}_{i-1}$, где матрица Ψ находится по методу наименьших квадратов (МНК) из условия $\sum_i |\Psi \mathbf{e}_{i-1} - \mathbf{e}_i|^2 \rightarrow \min$. Это соответствует идентификации динамической модели формирования ошибок. В (1) разности $\Theta(\Omega, t_i) - \mathbf{I}(t_i)$ заменяются на $\Theta(\Omega, t_i) - \mathbf{I}(t_i) - \Psi(\Theta(\Omega, t_{i-1}) - \mathbf{I}(t_{i-1}))$.

Исследована наземная обработка радионавигационных параметров (РНП) ГЛОНАСС с использованием только бортовых эфемерид, причем орбиты навигационных КА (НКА) уточняются вместе с орбитой КА из условия, аналогичного (1) для фазовой информации. При этом в целевую функцию вводится с малым весом условие близости уточненных орбит НКА к бортовым эфемеридам.

Высокоточное определение ориентации КА основано на совместной обработке измерений звёздных датчиков (ЗД) и измерителя угловой скорости путем минимизации целевой функции

$$\Lambda(\{\mathbf{Q}_i\}) = \sum_i (\mathbf{I}_i^{-1} \mathbf{Q}_i \mathbf{U})^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{I}_i^{-1} \mathbf{Q}_i \mathbf{U}) + \frac{1}{K_{\text{ис}}} \sum_{i \neq 0} |\overline{\mathbf{Q}}_i \mathbf{Q}_{i-1} \mathbf{S}_i|_{\text{B}}^2 / (t_i - t_{i-1})^2 \quad (2)$$

при наличии ограничений $\|\mathbf{Q}_i\| = 1$, где в данном случае кватернионы \mathbf{I}_i и \mathbf{Q}_i – исходные и фильтрованные измерения ЗД на моменты t_i , \mathbf{K} и \mathbf{U} – матрица ко-

вариации ошибок и установочный кватернион $\mathbf{3D}$, \mathbf{S}_i – интеграл от угловой скорости на интервале $[t_{i-1}, t_i]$, $K_{\text{ис}}$ характеризует шум измерений угловой скорости, $|\cdot|_{\text{в}}^2$ – норма векторной части кватерниона.

Минимизация (2) сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с блочно-трехдиагональной матрицей. Получено её вычислительно эффективное решение путем обобщения метода прогонки. В результате появилась важная возможность совместной обработки длительных массивов измерений $\mathbf{3D}$ и угловых скоростей, необходимая для уточнения параметров динамической модели: установочных углов, смещения ноля и чувствительности датчиков.

При наличии одновременных измерений от нескольких датчиков \mathbf{I}_p , где p – индекс датчика ($\mathbf{3D}$, GPS, ГЛОНАСС), предложено находить более точное усредненное измерение Θ из условия

$$\sum_p (\mathbf{U}_p \Theta + \mathbf{Z}'_p - \mathbf{I}_p)^T \mathbf{K}_p^{-1} (\mathbf{U}_p \Theta + \mathbf{Z}_p - \mathbf{I}'_p) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где \mathbf{U}_p , \mathbf{Z}_p и \mathbf{K}_p – параметры установки датчиков и матрица ковариации ошибок. Такой подход также позволяет уточнить параметры взаимной установки датчиков при анализе данных на длительных интервалах времени и оценить качество работы приборов по величинам невязок (3).

Для систем с механической разверткой необходима высокоточная информация об угловом положении сканирующих элементов (например, зеркала или грани призмы). Эта информация выдается датчиками углового положения (ДУП), функционирующими в составе системы автоматического управления (САУ) привода развертки. Необходима фильтрация измерений ДУП и оценка его градуировочной характеристики. Для наземной калибровки ДУП обычно используется высокоточный лазерный динамический гониометр (ЛДГ), измеряющий фактическое отклонение зеркала (призмы) α_i в моменты времени t_i . В режиме статической калибровки в САУ развертки закладывается условие стабилизации сканирующего элемента в некотором фиксированном положении, а показания ДУП усредняются для устранения собственных шумов. Так можно получить ряд точных точек α_i, D_i градуировочной характеристики ДУП $\alpha(D)$, но их количество, как правило, не достаточно. При динамической калибровке САУ развертки работает штатно, при многократном запуске сканирования ЛДГ фиксирует ряд отсчетов $\alpha_{k,j}, D_{k,j}$, но $D_{k,j}$ зашумлены. Мешающим фактором в оценке $\alpha(D)$ является явление дрейфа измерений углов. Поэтому $\alpha(D)$ оценивается по отчетам $\alpha_{k,j}, D_{k,j}$ усреднением с компенсацией дрейфа углов поправкой $\varepsilon_k = \bar{\alpha}_{k,j}$, которая находится по всем отчетам j в k -м сканировании. В результате достигается точность калибровки, соответствующая точности ЛДГ, за исключением наличия несущественной постоянной составляющей.

Рассмотренный метод геометрической обработки данных от различных российских систем ДЗЗ дал многократное повышение точности оценки навигационной информации за счет её предсказания и учета коррелированности ошибок. Например, на данных КА серии «Ресурс-П», накопленных за год, установ-

лено, что точность определения координат КА повышается в ~ 6 раз в плане и ~ 16 раз по высоте. Точность определения угловой ориентации КА по ЗД увеличена в ~ 2.7 раза. Всё это является подтверждением эффективности первого положения, выносимого на защиту.

Второе положение касается метода повышения точности координатной обработки космических изображений на основе идентификации динамических моделей съёмки по опорной информации, который позволил адекватно описать процесс формирования и коррекции изображений при наличии различного рода коррелированных ошибок.

Базовые геометрические модели (глава 1) имеют вид $\mathbf{z} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\mu})$, где $\boldsymbol{\mu} = (m, n)$ и $\mathbf{z} = (x, y)$ – координаты пикселей на регистрируемом изображении и в некоторой эталонной системе координат. Из-за погрешностей в исходных данных моделей имеется только оценка $\hat{\mathbf{F}}(\boldsymbol{\mu})$, которая характеризуется ошибкой $\mathbf{s}(\boldsymbol{\mu}) = \hat{\mathbf{F}}(\boldsymbol{\mu}) - \mathbf{F}(\boldsymbol{\mu})$. При сопоставлении с опорной информацией формируются измерения $\mathbf{u}(\boldsymbol{\mu}) = \mathbf{s}(\boldsymbol{\mu}) + \Delta\mathbf{u}(\boldsymbol{\mu})$, где $\Delta\mathbf{u}(\boldsymbol{\mu})$ – их погрешности.

В соответствии с априорной физической причиной возникновения ошибок (которые могут быть коррелированы в пространстве или во времени) вводится векторная переменная \mathbf{t} . Известна связь $\mathbf{t} = \mathbf{t}(\boldsymbol{\mu})$, поэтому вместо $\mathbf{s}(\boldsymbol{\mu})$ и $\mathbf{u}(\boldsymbol{\mu})$ можно рассматривать $\mathbf{s}(\mathbf{t})$ и $\mathbf{u}(\mathbf{t})$. Переменную \mathbf{t} удобно считать дискретной (например, индексом фрагмента изображения или сеанса съёмки).

Пусть основные процедуры калибровки съёмочной аппаратуры проведены и $\mathbf{s}(\boldsymbol{\mu})$ малы. Тогда $\mathbf{s}(\mathbf{t})$ коррелированы для близких значений \mathbf{t} . Для отдельных компонент $s(\mathbf{t})$, $u(\mathbf{t})$ векторов $\mathbf{s}(\mathbf{t})$, $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ обосновано использование фильтра Винера:

$$\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{t}) = W(\mathbf{t}) \otimes \mathbf{u}(\mathbf{t}), \quad W(\boldsymbol{\omega}) = |H(\boldsymbol{\omega})|^2 D[e] / (|H(\boldsymbol{\omega})|^2 D[e] + |I(\boldsymbol{\omega})|^2 D[\varepsilon]), \quad (4)$$

где $|H(\boldsymbol{\omega})|^2$, $|I(\boldsymbol{\omega})|^2$ – энергетические спектры ошибок $s(\mathbf{t})$ и $\Delta\mathbf{u}(\mathbf{t})$, а $D[e]$ и $D[\varepsilon]$ – их дисперсии.

Для упрощения нахождения опорных точек $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ их следует искать последовательно, упорядочив \mathbf{t} словарно, и оценивать начальное приближение $v(\mathbf{t})$ путем предсказания: $v(\mathbf{t}) = \sum_{\mathbf{d} > \mathbf{0}} P(\mathbf{d}) u(\mathbf{t} - \mathbf{d})$, где $P(\mathbf{d})$ – характеристика предсказателя. Предложено идентифицировать динамическую систему $P(\mathbf{d})$ с конечной импульсной характеристикой из условия $\sum_{\mathbf{t}} (u(\mathbf{t}) - v(\mathbf{t}))^2 = \min$. Также в предсказатель может быть включена дополнительная информация, например показания термодатчиков.

Для работы в реальном времени обоснована оценка $\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{t}) = \alpha v(\mathbf{t}) + (1 - \alpha) u(\mathbf{t})$, где $\alpha = D[\varepsilon] / (D[e] + D[\varepsilon])$. Для постобработки по (4) строится фильтр $L = (1 - P)^{-1}$, который образует знаменатель в (4), а ошибки $\Delta\mathbf{u}(\boldsymbol{\mu})$ по физическим соображениям независимы, при этом $|I(\boldsymbol{\omega})|^2 \equiv 1$.

Для ускорения геометрических преобразований изображений с ВЧ-искажениями предложен подход к повышению порядка аппроксимации сложных функций в пределах четырехугольных областей изображения. Значения полиномов вычисляются за счет арифметических прогрессий высшего порядка. Колебания (в том числе экспоненциально затухающие) описываются однородным разностным уравнением $u(t) + a_1 u(t-1) + \dots + a_K u(t-K) = 0$. Амплитуды и фазы полиномиальных и тригонометрических составляющих задаются числами $u(1), \dots, u(K)$ для каждого фрагмента изображения отдельно. Коэффициенты a_1, \dots, a_K фиксированы для съёмочной системы и определяются заранее по МНК на основе построения линейного предсказателя.

Для многоскановых изображений данные в областях перекрытия суммируются с весами, плавно снижающимися до нуля на границах областей. Для эффективного распараллеливания обработки предложено организовать суммирование без операций атомарного доступа к памяти при помощи нескольких групп буферов.

Предложенный метод носит универсальный характер, он применим для различных систем ДЗЗ вне зависимости от их принципа действия. Например, метод апробирован на более чем 5000 изображений от спутников серии «Электро-Л». В результате адекватного построения моделей съёмки и обработки изображений ошибки геометрии уменьшены по горизонтали в 3.5 раза, а по вертикали в 13.5 раза. Тем самым подтверждается эффективность второго положения, выносимого на защиту.

Глава 3. Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных от систем глобального наблюдения Земли

В этой главе выдвигается и обосновывается третье положение, выносимое на защиту, а именно: математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных от систем глобального наблюдения Земли на фоне окружающего космоса, основанное на использовании специфичной для этих систем опорной информации. Как уже отмечалось, для систем глобального наблюдения характерны построение широкоугольных скановых датчиков с двухкоординатной разверткой и использование в качестве опорной информации контурных точек диска Земли и карт береговых линий.

Разработаны алгоритмы анализа данных наземной калибровки скановых датчиков с двухкоординатной разверткой на стенде АО «Российские космические системы». Изображение тест-объекта, содержащего систему отверстий, формируется коллиматором и регистрируется датчиком несколько раз под различными углами α, β для полного покрытия поля зрения. Определяются визирные векторы отверстий (i, j) на выходе коллиматора как $\mathbf{v}_{ij} = (f, -y_{ij}, -z_{ij})$, где f – фокусное расстояние коллиматора, y_{ij}, z_{ij} – координаты отверстий. Последние находятся в рамках модели дисторсии оптики коллиматора по видимым угловым координатам $\gamma_{kl}, \lambda_{kl}$ отдельных отверстий с индексами (k, l) из условия близости моделируемых и измеренных координат:

$$\sum_{(k,l)} [(x_{kl} - f \operatorname{tg} \lambda_{kl} / \cos \gamma_{kl})^2 + (y_{kl} - f \operatorname{tg} \gamma_{kl})^2] \rightarrow \min. \quad (5)$$

При съёмке под углами α, β векторы \mathbf{v}_{ij} вращением на α и β трансформируются в $\mathbf{r}_{ij}^{\alpha\beta}$. Алгоритм распознавания отверстий основан на бинаризации изображения $B_{\alpha\beta}(m, n)$ с учетом известной доли площади отверстий и выделении связных областей допустимой площади с координатами центра масс (m_t, n_t) . Проблемным является распознавание индекса отверстия по координатам. Композицией моделей съёмки и коллиматора строится априорная связь $R_{\alpha\beta}$ индексов (i, j) и координат (m, n) . Она позволяет грубо оценить индексы как $(\xi_t, \zeta_t) = R_{\alpha\beta}^{-1}(m_t, n_t)$. Далее определяются относительные индексы областей, поскольку изменение индекса у соседних отверстий близко к истинному даже при сильных геометрических искажениях. Абсолютные индексы определяются из условия нахождения маркерных отверстий малой площади на диагоналях. В итоге уточняются конструктивные параметры \mathbf{P} модели датчика $\mathbf{r}_0(m, n, \mathbf{P})$ из условия $\sum_{i,j,\alpha,\beta} \left| \mathbf{r}_{ij}^{\alpha\beta} - \mathbf{r}_0(m_{ij}^{\alpha\beta}, n_{ij}^{\alpha\beta}, \mathbf{P}) \right|^2 \rightarrow \min$.

В современных датчиках одни и те же объекты наблюдаются в различных частях изображений (сканах и спектральных каналах). Если для изображений с индексами (k, l) получены координаты одноименных объектов (m_{ki}, n_{ki}) и (m_{li}, n_{li}) , то они при калибровке добавляются в целевую функцию невязок в виде слагаемого $f_2 = \sum_{k < l, i} \left| \mathbf{F}_k(m_{ik}, n_{ik}, \mathbf{P}_k) - \mathbf{F}_l(m_{il}, n_{il}, \mathbf{P}_l) \right|^2$, где $\{\mathbf{F}_k\}$ – множество параметрических моделей съёмки, а отдельные параметры \mathbf{P}_k входят в общий вектор параметров, строение которого отражает иерархическую структуру датчика. Когда различные части изображения формируются одним и тем же оптоэлектронным трактом за счет изменения положения сканирования зеркала, такой подход позволяет выполнить калибровку датчика даже без привлечения абсолютных ориентиров.

Использование одноименных координат (m_{ki}, n_{ki}) и (m_{li}, n_{li}) позволяет уточнить динамику изменения ориентации спутника и сканирующих элементов. Для этого рассматриваются рассогласования $(\Delta m_i, \Delta n_i) = (m_{li}, n_{li}) - \mathbf{F}_l^{-1}(\mathbf{F}_k(m_{ki}, n_{ki}))$, где $\mathbf{F}_k, \mathbf{F}_l$ – геометрические модели съёмки. Пусть $t_{li} = t_l(m_{li}, n_{li})$, $t_{ki} = t_k(m_{ki}, n_{ki})$ – моменты времени наблюдения объектов. Если развертка осуществляется за счет изменения угла сканирования α , то разность Δm_i описывает погрешность измерения угла $\Delta\alpha(m)$ в виде конечной разности $\Delta m_i = \Delta\alpha(m_{li}) - \Delta\alpha(m_{ki})$. Пусть $\Delta\alpha(m)$ входит в параметрическое семейство $\Delta\alpha(m, \mathbf{G})$, где \mathbf{G} – вектор параметров. Тогда оценивается $\hat{\mathbf{G}} = \arg \min_{\mathbf{G}} \sum_i (\Delta\alpha(m_{li}, \mathbf{G}) - \Delta\alpha(m_{ki}, \mathbf{G}) - \Delta m_i)^2$. Для систем с механической раз-

верткой обоснована модель $\Delta\alpha(m, \mathbf{G}) = \sum_g (a_g \cos(g\omega m) + b_g \sin(g\omega m))$, где

$\mathbf{G} = (\omega, a_1, b_1, a_2, \dots)$. Применение такого подхода апробировано на датчиках систем «Электро-Л» и «Арктика-М», в результате ошибки совмещения, например, каналов видимого диапазона (ВД) уменьшены с 0.6 до 0.17 пикселя, т.е. примерно в 3.5 раза.

Для геодезической привязки изображений по контурным точкам диска Земли описана эталонная форма контурных точек. Показано, что для расположения КА в точке $\mathbf{R}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ проекция земного эллипсоида с полуосями a_3, b_3 на вспомогательную плоскость, проходящую через центр Земли с направляющим вектором $\mathbf{S} = (X_0, Y_0, Z_0, a_3^2/b_3^2)$, есть эллипс с полуосями

$$a = a_3 \sqrt{\mathbf{S} \mathbf{R}_0 / (\mathbf{S} \mathbf{R}_0 - a_3^2)}, \quad b = b_3 \sqrt{\mathbf{S}^2 / (\mathbf{S} \mathbf{R}_0 - a_3^2)}. \quad (6)$$

Расположение контурных точек диска Земли на изображениях из-за искажений при съёмке может существенно отличаться от эллипса. Поэтому предложено с использованием модели съёмки геометрическое преобразование координат изображения (m, n) во вспомогательную плоскость (x', y') , в которой контурные точки диска Земли в идеале лежат на эллипсе с полуосями (6). Для наблюдения с высокой эллиптической орбиты дополнительно учитываются значимые изменения координат спутника в процессе съёмки.

Предложены два подхода к выявлению контурных точек диска на изображениях. Первый подход основан на поиске контурных точек диска в координатах (m, n) . Для этого по модели съёмки предсказывается количество η_k точек космоса на изображении и выполняется его бинаризация на области космоса и диска Земли по порогу яркости $b_{\text{п}}$, который выбирается по гистограмме $G(b)$ из условия $\sum_{b < b_{\text{п}}} G(b) = \eta_k$. На бинарном изображении находятся связные

области из 0 и 1 максимальной площади; точки их соприкосновения считаются контурными. Их координаты пересчитываются во вспомогательную плоскость.

Второй подход основан на предварительной геометрической трансформации изображения во вспомогательную плоскость. Это трудоёмкая операция, позволяющая повысить качество изображений за счет методов, рассмотренных в главе 5. Для нахождения контурных точек диска Земли используется корреляционно-экстремальный поиск на основе бинарных масок в виде секторов.

Далее по найденным контурным точкам по МНК определяются координаты центра $(X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}})$ ближайшего эллипса, угол его поворота φ и полуоси $a_{\text{д}}, b_{\text{д}}$. В итоге находятся поправки к углам ориентации спутника:

$$\Delta\alpha = \text{arctg}(X_{\text{ц}} / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}), \quad \Delta\omega = \text{arctg}(Y_{\text{ц}} / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}), \quad \Delta\chi = \varphi. \quad (7)$$

Высота полета спутника корректируется умножением \mathbf{R}_0 на средний коэффициент изменения масштаба $0.5(a/a_{\text{д}} + b/b_{\text{д}})$.

Предложен новый подход к использованию электронных карт (ЭК) береговых линий для координатной привязки данных от систем глобального наблю-

дения Земли. Он основан на создании несимметричных бинарных масок, учете различной точности корреляционного поиска в зависимости от направления, систематических ошибок электронной карты и мешающего действия облачности. ЭК трансформируются в проекцию выходных изображений и растеризуются. Отбирается ряд участков береговой линии E_i . Выделяются примыкающие к E_i области «морья» Ω_{0i} и «суши» Ω_{1i} и строится бинарная маска A_i , нулевая на «море» Ω_{0i} и единичная на «суше» Ω_{1i} . Для отождествления i -го объекта на снимке B выполняется корреляционно-экстремальный поиск маски A_i . В результате для центров маски \mathbf{p}_i^3 находится одноименная точка изображения \mathbf{p}_i . В силу бинарности A_i коэффициент корреляции находится очень просто:

$$\rho = (\bar{B}_1 - \bar{B}_0) \sqrt{|\Omega_1| |\Omega_0|} / (\sqrt{D_B} (|\Omega_1| + |\Omega_0|)), \quad (8)$$

где \bar{B}_1 , \bar{B}_0 – средние яркости снимка под единичными и нулевыми участками маски; D_B – дисперсия снимка под $\Omega_i = \Omega_{0i} \cup \Omega_{1i}$. При последовательном перемещении по зоне поиска обновление значений \bar{B}_1 , \bar{B}_0 , D_B требуется не для всех пикселей области Ω_i , а только на границах Ω_{0i} , Ω_{1i} , что значительно ускоряет корреляционный поиск.

Наиболее важны фрагменты карты уникальной геометрической формы, однако их количество мало. Предложен подход, позволяющий использовать любые участки береговых линий, в том числе линейные. Для этого оценивается автокорреляционная функция $K_i(x, y)$ маски A_i . На ней выделяется главный пик и рассчитывается матрица вторых моментов \mathbf{K}_i , характеризующая остроту пика во всех возможных направлениях. Далее построение полиномов регрессии \mathbf{P} выполняется из условия

$$\sum_i (\mathbf{P}(\mathbf{p}_i) - \mathbf{p}_i^3)^T \mathbf{K}_i^{-1} (\mathbf{P}(\mathbf{p}_i) - \mathbf{p}_i^3) \rightarrow \min. \quad (9)$$

Для линейных фрагментов функционал (9) реагирует только на сдвиги поперек линии.

Для повышения точности корреляционного поиска на основе анализа (8) предложено использовать несимметричные бинарные маски с $|\Omega_1| \neq |\Omega_0|$, а также оценивать и корректировать систематические нестыковки $\Delta \mathbf{p}_i$ карты и изображения. Для устранения мешающего действия облачности в зоне корреляционного поиска выделяются две области, заведомо принадлежащие «морю» и «суше». По их яркости настраивается порог для сегментации «переходной» области на «сушу» и «море». В найденной области «морья» удаляются все связанные объекты с яркостью, большей, чем у «суши», поскольку им заведомо соответствуют облака.

Для высокоэллиптических систем видимость диска Земли и проекция выходных изображений изменяются от сеанса к сеансу. Поэтому каждая маска A_i формируется в локальной системе координат, соответствующей наилучшим условиям наблюдения данной области земной поверхности.

На рисунке 1 представлены пример исходного ИК изображения КА «Электро-Л» (слева) и результат его геометрической коррекции (справа).

Предложенное математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных от систем глобального наблюдения Земли позволило достичь субпиксельной точности координатной обработки данных КА серии «Электро-Л» (до 0.2-0.5 пикселя по СКО). Тем самым подтверждена эффективность третьего положения, выносимого на защиту.

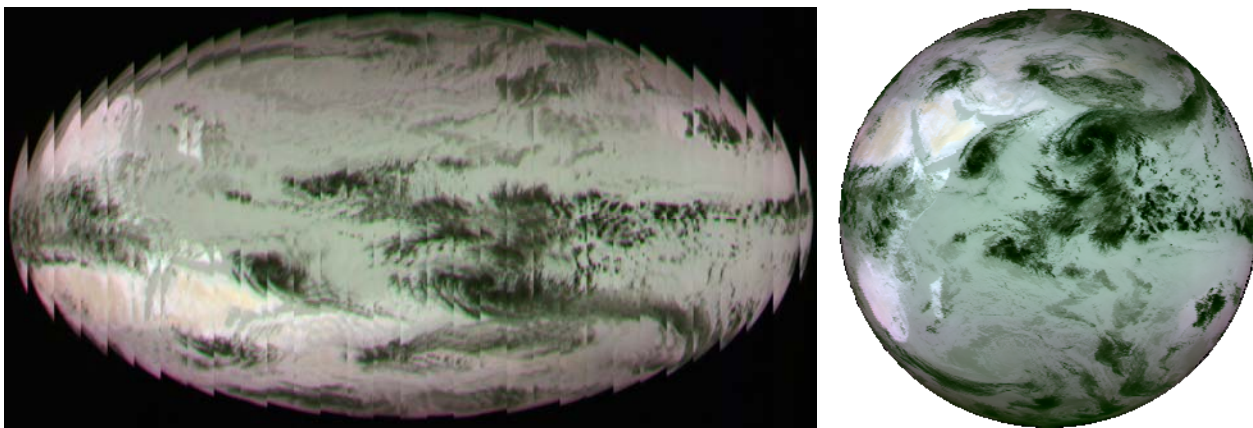


Рисунок 1 – Пример геометрической коррекции снимка КА «Электро-Л»

Глава 4. Метод высокоточного определения трехмерных координат объектов в космических системах радиолокационного наблюдения Земли

В этой главе выдвигается и обосновывается четвертое положение, выносимое на защиту, а именно: метод высокоточного определения рельефа местности по данным радиолокационного наблюдения Земли. Он основан на интерферометрической обработке пар изображений, полученных из различных точек пространства, и привлечении цифровых моделей рельефа (ЦМР), сформированных ранее различными системами ДЗЗ. Такой подход защищен патентом РФ.

В радиолокации основная ошибка в определении координат объектов связана с неточной оценкой высот точек местности. При интерферометрической обработке высота объектов извлекается на основе сопоставления фаз одноименных точек на паре изображений. При этом центральной задачей является устранение неоднозначности фазы, заключающейся в неизвестном числе целых периодов волны излучения. Это некорректно поставленная задача. Улучшить её решение предлагается за счет привлечения ЦМР, полученных от других систем ДЗЗ с более худшей точностью.

Вначале решается задача совмещения пар радиолокационных изображений (РЛИ). Цифровая модель рельефа в виде зависимости высоты $h(\Lambda)$ от координат Λ на Земле преобразуется в геометрию первого РЛИ: $h(\Lambda) \rightarrow h(m, n)$. Этот процесс основан на решении системы уравнений:

$$\Lambda = F_1(m, n, h), \quad h = h(\Lambda), \quad (10)$$

где $F_1(m, n, h)$ – базовая геометрическая модель формирования РЛИ. Решение (10) выполняется методом Ньютона, за счет последовательного перебора (m, n) требуемое число итераций резко сокращается. Для дальнейшего ускорения рас-

четов $\mathbf{F}_1(m, n, h)$ аппроксимируется на трехмерной сетке дискретных отчетов с использованием подходов главы 2. Для локационной геометрии решение (10) может быть неоднозначным. Точки неоднозначности выявляются и описываются нулями в маске неоднозначности $M_{\text{неодн}}(m, n)$.

По базовым моделям формирования пары РЛИ $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ строится функция совмещения изображений $\mathbf{F}_{12}(m, n; h) = \mathbf{F}_2^{-1}(\mathbf{F}_1(m, n, h), h)$. Показано, что с приемлемой точностью $\mathbf{F}_{12}(m, n; h) \approx \sum_{p=0}^P A_p(m, n) h^p$, где $A_p(m, n)$ рассчитываются на основе $(P+1)$ сечений $B_p(m, n) = \mathbf{F}_{12}(m, n; p\Delta h)$, $p = \overline{0, P}$, взятых с некоторым шагом высот Δh . Функции $B_p(m, n)$, $p = \overline{0, P}$, – достаточно гладкие и интерполируются по малому количеству дискретных точек с использованием подходов главы 2. В результате время совмещения изображений многократно уменьшается.

Наиболее проблемным вопросом является операция развертывания фазы интерферограммы $\Delta\varphi(m, n)$. Её решение обычно сводится к интегрированию поля градиента $\mathbf{G}(m, n) = \mathbf{grad}_{2\pi} \Delta\varphi(m, n)$, значения которого находятся по модулю 2π . Необходимо выявить и исключить из рассмотрения точки так называемого разрыва фазы, где $\mathbf{G}(m, n)$ сильно отличается от истинного градиента фазы.

Предложен подход предварительного выявления и исправления разрывов фазы. Он основан на поиске сингулярных точек изображения с $\mathbf{rot} \mathbf{G}(m, n) \neq 0$ и проведении потоков от точек с $\mathbf{rot} \mathbf{G}(m, n) > 0$ к точкам с $\mathbf{rot} \mathbf{G}(m, n) < 0$ в транспортной сети. Узлы этой сети образованы пикселями интерферограммы, а дуги соответствуют вертикальным, горизонтальным и диагональным путям между соседними пикселями.

Проводятся только самые «дешевые» потоки, для чего задаётся ограничение L_0 на максимальную стоимость потока. Поток проводится между сингулярными точками разного знака ротора, расстояние между которыми $\leq L_0$. При этом на пути проведения потока корректируется градиент $\mathbf{G}(m, n)$ из условия аннигиляции пары сингулярных точек. Вначале L_0 задаётся равным кратчайшей длине дуги сети, а затем L_0 постепенно увеличивается.

Назначение длин дугам сети основано на анализе наклона фазовой поверхности, который в условиях наличия фазовых шумов оценивается медианной фильтрацией: $\overline{\mathbf{G}}(m, n) = Me \{ \mathbf{G}(m+a, n+b) : |a|, |b| < W \}$, где W – размер «окна». Дугам, направления которых совпадают с $\overline{\mathbf{G}}(m, n)$, назначаются меньшие длины.

Предложен алгоритм дополнительного выявления линий разрыва фазы в областях резкого изменения высоты по хаотическим флуктуациям модуля и направления градиента. Для этого вводится оценка

$$s(m, n) = \min \left\{ s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}(m + \Delta m, n + \Delta n)), (\Delta m, \Delta n) \perp \mathbf{G}_1, \Delta m^2 + \Delta n^2 < W^2 \right\}, \quad (11)$$

где $\mathbf{G}_1 = \mathbf{G}(m, n)$, а $s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$ – мера сходства векторов градиентов $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$.

Для развертывания фазы обоснована целесообразность использования известного весового МНК. При этом вес в точке (m, n) принимается нулевым, если $s(m, n) > s_{дон}$, где $s_{дон}$ некоторый порог, либо если маска $M_{неодн}(m, n) = 0$, либо если компоненты градиента фазы опорного рельефа $\varphi_{опорн}(m, n)$, оцененные по $h(m, n)$, выходят за интервал $(-\pi, \pi)$. Дополнительно анализируются остаточные невязки МНК: при наличии высоких острых пиков, указывающих на невыявленные линии разрыва фазы, в них обнуляются веса и алгоритм МНК выполняется заново.

Может оказаться, что линиями нулевых весов интерферограмма разбивается на ряд несвязных областей. Тогда средняя высота в них уточняется по фазе опорного рельефа и условиям минимума скачка фазы на границе. В областях нулевых весов фаза восстанавливается интерполяцией методом обратных взвешенных расстояний.

Анализ весового МНК показал, что вместо развертывания исходной интерферограммы $\Delta\varphi(m, n)$ целесообразно развертывать разность

$$\vartheta(m, n) = (\Delta\varphi(m, n) - \Delta\varphi_{опорн}(m, n)) \otimes \Phi_1(m, n), \quad (12)$$

$$\Phi_1(\omega, \xi) = \frac{N_{опорн}(\omega, \xi)}{N(\omega, \xi) + N_{опорн}(\omega, \xi)}, \quad N(\omega, \xi) = 1 / \left(|1 - e^{-j\omega}|^2 + |1 - e^{-j\xi}|^2 \right), \quad (13)$$

где $\Phi_1(m, n)$ и $\Phi_1(\omega, \xi)$ – импульсная и частотная характеристики фильтра, $N_{опорн}(\omega, \xi)$ – оценка шума опорной ЦМР. Далее к развернутой фазе $\vartheta_{разв}(m, n)$ прибавляется фаза опорного рельефа: $\Delta\varphi_{разв}(m, n) = \vartheta_{разв}(m, n) + \Delta\varphi_{опорн}(m, n)$. Поскольку $\Delta\varphi(m, n)$ определена по модулю 2π , фильтрация в (12) применяется к комплексному сигналу $c(m, n) = e^{j(\Delta\varphi(m, n) - \Delta\varphi_{опорн}(m, n))}$, а $\vartheta(m, n)$ определяется как аргумент $c(m, n) \otimes \Phi_1(m, n)$.

Неточности знания орбит КА приводят к ошибке в оценке рельефа, которая практически линейно зависит от номеров строки и столбцов интерферограммы: $e(m, n) = K_1 n + K_2 m$, где K_1, K_2 – некие коэффициенты. Также возникает ошибка при оценке коэффициента пересчета фазы в высоту a_1 . Обычно K_1, K_2, a_1 оцениваются путем сопоставления $\Delta\varphi_{разв}(m, n)$ и $\Delta\varphi_{опорн}(m, n)$. Однако для улучшения развертки фазы следует уточнить a_1 до пересчета ЦМР $h(m, n)$ в $\Delta\varphi_{опорн}(m, n)$, для чего требуется оценить K_1, K_2, a_1 по исходной интерферограмме $\Delta\varphi(m, n)$.

Вначале сглаживающим фильтром Φ интерферограмма $\Delta\varphi(m, n)$ «размывается» до разрешения опорной ЦМР и рассматриваются отклонения от опорного рельефа:

$$v(m, n) = \mathfrak{N}_{2\pi}(\Delta\varphi_{нд}(m, n) - \Delta\varphi_{опорн}(m, n)), \quad \Delta\varphi_{нд}(m, n) = \arg(e^{j\Delta\varphi(m, n)} \otimes \Phi(m, n)), \quad (14)$$

где $\mathfrak{N}_b(a) = a - b \cdot \lfloor a/b + 0.5 \rfloor$, $\lfloor c \rfloor$ – ближайшее целое, не превосходящее c .

Градиент $\Gamma(m, n) = \mathbf{grad}_{2\pi} v(m, n)$ позволяет оценить параметры ошибочного набега фазы:

$$(\hat{K}_1, \hat{K}_2) = \sum_{(m,n)} \Gamma(m, n) \bar{w}_{m,n} / \sum_{(m,n)} \bar{w}_{m,n}, \quad \bar{w}_{m,n} = \gamma(m, n) \otimes \Phi(m, n), \quad (15)$$

где $\gamma(m, n)$ – поле когерентности интерферограммы. В местах выявленных фазовых разрывов принимается $\gamma(m, n) = 0$.

Коррекция коэффициента a_1 пересчета фазы в высоту основана на анализе СКО низкодетальной фазы от опорной. В пределах малого фрагмента Ω легко найти развернутую фазу $v(p, q)$ для разности фаз $\Delta\varphi_{нд}(m, n) - \Delta\varphi_{опорн}(m, n)$. Если $\sigma_{нд}$ и $\sigma_{опорн}$ – это СКО сигналов $v(m, n)$ и $\Delta\varphi_{опорн}(m, n)$ в пределах Ω , то мультипликативная поправка Δa_1 к коэффициенту a_1 определяется как $\sigma_{нд} / \sigma_{опорн}$. На практике поправка Δa_1 находится усреднением по множеству фрагментов Ω .

С учетом найденной Δa_1 корректируются $\Delta\varphi_{опорн}(m, n)$, $\Delta\varphi_{нд}(m, n)$ и $v(m, n)$. Далее находятся более точные оценки K_1, K_2 из переопределенной системы уравнений вида

$$\mathfrak{N}_{2\pi}(\varphi_0 + K_1 n + K_2 m - v(m, n)) = 0, \quad (16)$$

записанных для точек изображения (m, n) . Показано, что решение системы уравнений (16) можно свести к многократному решению СЛАУ по МНК.

Предложенный метод высокоточного определения рельефа местности для космических систем радиолокационного наблюдения Земли позволил на данных от зарубежных систем TerraSAR-X, RadarSat-2, COSMO-SkyMed в среднем в 5 раз увеличить точность оценивания высоты при интерферометрической съёмке по сравнению с лучшим из известных методов решения рассматриваемой задачи – методом потоков минимальной стоимости. Это позволило соответственно улучшить точность определения координат объектов. Тем самым подтверждена эффективность четвертого положения, выносимого на защиту.

Глава 5. Повышение геометрического качества изображений на основе неравномерной дискретизации и коррекции расфокусировки

В этой главе выдвигаются и обосновываются пятое и шестое положения, выносимые на защиту.

Пятое положение касается метода объединения на основе теории неравномерной дискретизации информации от $K \geq 2$ линеек фотоприёмников, установленных параллельно в фокальной плоскости датчика поперек направления полета спутника и формирующих изображения одной и той же сцены с субпиксельными смещениями. Такое объединение данных от нескольких линеек фотоприёмников позволяет повысить пространственное и радиометрическое разрешение съёмки.

Поставлена задача формирования изображения $E(x, y)$ с лучшим пространственным разрешением по изображениям $B_k(m_k, n_k)$ от K одинаковых

линеек фотоприёмников при условии, что геометрия сканирования известна и описана в виде функций $(m_k, n_k) = \mathbf{F}_k(x, y)$. Если частоты опроса линеек одинаковы, то порожденные ими сетки дискретизации W_k параллельны друг другу: $W_k \approx W_1 + \xi_k$, где $\xi_k = (\tau_k, \eta_k)$ – вектор сдвига, сложным образом зависящий от датчика и условий съёмки.

При достаточно высокой частоте опроса линеек можно повысить пространственное разрешение в K раз вдоль расположения линеек. Для этого для произвольной точки (x^0, y^0) формируемого изображения строится полином $P(r)$ порядка $(2K - 1)$, значения которого удовлетворяют уравнениям

$$\begin{aligned} P(\lfloor n_k^0 \rfloor - n_k^0) &= B_k(m_k^0, \lfloor n_k^0 \rfloor), & P(\lfloor n_k^0 \rfloor + 1 - n_k^0) &= B_k(m_k^0, \lfloor n_k^0 \rfloor + 1), \\ (m_k^0, n_k^0) &= F_k(x^0, y^0), & k &= \overline{1, K}. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда искомая яркость $E(x^0, y^0) = P(0)$.

Практически важной задачей является повышение разрешения съёмки в $K' < K$ раз, что даёт возможность дополнительно улучшить радиометрическое качество изображений. В работе представлено решение этой задачи на основе оптимального восстановления непрерывного изображения сцены $S(x, y)$ с произвольным финитным спектром с носителем Ω по дискретным отсчетам

$$S_{\perp k}(x, y) = S(x, y) \sum_{p, q} \delta(x - \tau_k - p) \delta(y - \eta_k - q), \quad (18)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция.

Пусть $U(\omega, \xi) = \{(p, q) : (\omega - 2\pi p, \xi - 2\pi q) \in \Omega\}$, $z_k = e^{-i2\pi\tau_k}$, $w_k = e^{-i2\pi\eta_k}$.

Разбивая Ω на поддиапазоны Ω_d с $U(\omega, \xi) = U_d$, $d = \overline{1, D}$, составляем СЛАУ

$$\sum_{k=1}^K h_{k,d} z_k^p w_k^q = \delta_{0,p} \delta_{0,q}, \quad (p, q) \in U_d. \quad (19)$$

В работе доказано, что для восстановления S по $S_{\perp k}$ необходимо и достаточно, чтобы СЛАУ (19) для всех $d = \overline{1, D}$ были разрешимы относительно $h_{k,d}$. Нормальные решения обеспечивают оптимальное радиометрическое качество восстановления изображения в спектральной области по формуле

$$S^*(x, y) = \sum_{d=1}^D (\chi_d^\vee(x, y) \otimes \sum_k S_{\perp k} h_{k,d}), \quad (20)$$

где $\chi_d^\vee(x, y)$ – обратное преобразование Фурье от характеристической функции $\chi_d(\omega, \xi)$ множества Ω_d . Функции $\chi_d(\omega, \xi)$ не зависят от сдвигов τ_k, η_k , поэтому при изменении геометрии съёмки требуется обновление только масштабирующих коэффициентов $h_{k,d}$ в (20) на основе решения (19).

Найдены необходимые и достаточные условия разрешимости (19). Чувствительность к шумам при восстановлении по (20) оценена как $\varepsilon = \sum_d \sum_k |h_{k,d}|^2$. Изучено поведение ε в зависимости от сдвигов τ_k, η_k , что позволило оптими-

зировать строение фокальной плоскости датчика для различных условий съёмки. Проанализированы важные для практики случаи носителя Ω в виде круга и параллелограмма и соответствующие им фильтры $\chi_d(\omega, \xi)$. Решена задача упрощения восстановления по (20) как за счет оптимального выбора условий съёмки, так и с точки зрения применения стандартных фильтров (вплоть до единственного ФНЧ) ценой некоторого роста ошибки восстановления.

Эффективность рассмотренного метода объединения информации от K линеек фотоприёмников с субпиксельно смещенными полями зрения для повышения пространственного разрешения до K раз строго доказана теоретически. Экспериментальная проверка метода, выполненная на данных КА серии «Электро-Л», подтвердила правильность выдвинутых теоретических результатов, что доказывает пятое положение, выносимое на защиту.

Шестое положение касается метода коррекции смаза и расфокусировки изображений, основанного на аналитических моделях съёмки и анализе пар изображений одной и той же сцены, что позволило без трудоёмкой операции оценки функции рассеяния точки выровнять разрешение в различных каналах гиперспектральной аппаратуры и повысить разрешение «смазанных» изображений до 16 раз.

Базовая модель съёмки в режиме с временной задержкой и накоплением заряда детализируется в виде функции $\Lambda = \mathbf{F}(x, y, t)$, где ось x расположена вдоль строки матрицы, а ось $y \perp x$ и направлена вдоль переноса заряда. Из матрицы Якоби для \mathbf{F} выражаются скорости бега изображения в фокальной плоскости V_x, V_y . Вводится система координат (τ, η) :

$$\tau = \Delta_x n + V_x m / f, \quad \eta = V_y m / f, \quad (21)$$

где Δ_x, Δ_y – расстояния между фотоприёмниками матрицы по x и y , f – частота опроса строк матрицы. В координатах (τ, η) расфокусировка изображений описывается ФРТ $F(\tau, \eta)$ инвариантно к геометрии съёмки, а смаз – функцией

$$G(\tau, \eta) = \sum_{v=0}^{N-1} \delta(\tau - vV_x / f) \delta(\eta - v(\Delta_y + V_y / f)), \quad (22)$$

где N – число строк накопления.

Разработана единая технология коррекции смаза и расфокусировки. В частотной области свертка $G(\tau, \eta) \otimes F(\tau, \eta)$ описывается общим фильтром $F(\omega, \xi)$. Для устранения смаза и расфокусировки предложен модифицированный фильтр Винера:

$$V'(\omega, \xi) = \frac{\overline{F}(\omega, \xi)}{|F(\omega, \xi)|^2 + \mu \varepsilon} \frac{|O(\omega, \xi)|^2 + \mu \varepsilon}{|O(\omega, \xi)|^2 + \varepsilon}, \quad (23)$$

где $O(\omega, \xi)$ – огибающая функции $F(\omega, \xi)$, ε – параметр шума на изображении, μ – параметр добротности, позволяющий при $\mu < 1$ уменьшить «тени» на изображениях. Для компенсации усиления шумов при фильтрации используется их подавление с применением вейвлетов. Коэффициенты a_{kj} вейвлет-

разложения $B(\tau, \eta) = \sum_k \sum_j a_{k,j} \varphi_{k,j}(\tau, \eta)$ обнуляются, если $|a_{k,j}| < \sigma \lambda_k$, где λ_k – коэффициент усиления шума фильтром (23) для масштаба k , σ – СКО шума на изображении.

Наиболее удобно задавать $G(\tau, \eta)$ непосредственно в частотной области: $G(\omega, \xi) = \text{sinc } 0.5(\omega b + \xi c)$, $b = N V_x / f$, $c = N (\Delta_y + V_y / f)$. Оценка ФРТ при расфокусировке выполняется по точечным объектам (звёздам, наземным полигонам и др.): $F(\tau, \eta) = (B(\tau, \eta) - a + |B(\tau, \eta) - a|)^b$, где a , b – параметры, подбираемые с учетом наилучшего качества коррекции изображений.

На рисунке 2 слева представлен пример смазанного изображения КА «Ресурс-ДК», справа – результат его коррекции.

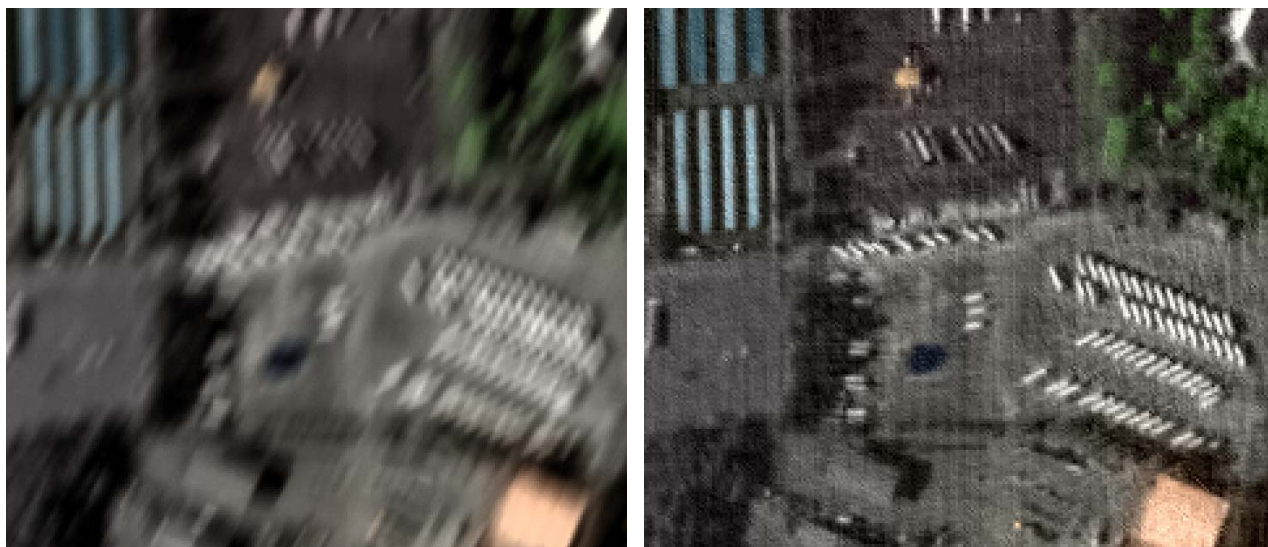


Рисунок 2 – Пример коррекции смаза изображения

В работе также рассмотрена важная задача выравнивания разрешения для пары перекрывающихся изображений $A(x, y)$ и $B(x, y)$, полученных различными оптоэлектронными блоками, что обычно приводит к расфокусировке одного изображения по отношению к другому. Чтобы не оценивать ФРТ для этих изображений, предложено определять фильтр F из условия $A(x, y) \otimes F(x, y) = B(x, y)$. Для устранения мешающего действия шумов используется серия фрагментов изображений A_i , B_i . В спектральной области оценка F находится как

$$F(\omega, \xi) = \sum_i B_i(\omega, \xi) \overline{A_i(\omega, \xi)} / \sum_i |A_i(\omega, \xi)|^2. \quad (24)$$

Такой подход позволяет оценивать достаточно протяженные в пространстве фильтры F . При компактном носителе $F(x, y)$ его оценку целесообразно проводить из системы уравнений вида $[A \otimes F^*](x, y) = B(x, y)$, включающей все пиксели изображений A, B .

Если на изображениях A, B присутствуют геометрические или сюжетные различия, то производится корреляционное уточнение совмещения фрагментов

A_i, B_i , а затем в (24) вводятся веса, пропорциональные коэффициенту корреляции.

Предложенный метод коррекции смаза и расфокусировки изображений, основанный на аналитических моделях съёмки и анализе пар изображений одной и той же сцены, защищен патентом РФ и прошел апробацию на натуральных данных от различных систем ДЗЗ («Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Аист-2Д», «Электро-Л», изделий специального назначения). В результате установлено, что метод позволяет повысить разрешение снимков до 16 раз (при существенных искажениях). Это является весомым основанием для подтверждения эффективности шестого положения, выносимого на защиту.

Глава 6. Точностной анализ и реализация методов высокоточной геометрической обработки информации от современных систем космического зондирования Земли

Метод повышения точности навигационной информации спутника на основе идентификации динамических моделей измерений (Глава 2. Положение 1, выносимое на защиту). Для априорной оценки точности исходные задачи сводятся к МНК вида $(\mathbf{AX} - \mathbf{B})^T \mathbf{P} (\mathbf{AX} - \mathbf{B}) \rightarrow \min$. Тогда при независимых ошибках в исходных измерениях \mathbf{B} ошибки в \mathbf{X} описываются матрицей $\text{cov}[\mathbf{X}] = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}$. Такой подход даёт прогноз значимого (>15 раз) уменьшения СКО определения координат и скоростей спутников, находящихся на низких орбитах, при накоплении измерений от текущего и предыдущего витков их полета. Например, для высоких эллиптических орбит по измерениям в перигее (с высотами до 3000 км) можно спрогнозировать орбиту в апогее с СКО ~100 м (при разрешении съёмки ~1 км).

Более важны для практики апостериорные оценки точности, которые можно найти по эталонным высокоточным значениям величин, например полученным пост-обработкой данных ГЛОНАСС. На информации от низкоорбитальных КА серии «Ресурс-П», накопленной за год, выполнены оценки СКО исходных и обработанных измерений. При этом объединялась информация от 4-х приёмников ГЛОНАСС и 4-х звёздных датчиков ориентации. Полученные на борту по ГЛОНАСС и GPS оценки координат КА имеют СКО 2.4 м / 4.1 м (в плане / по высоте). Использование предложенного метода позволило достичь СКО 0.4 м / 0.26 м, динамическая фильтрация без идентификации даёт 1.2 м / 0.3 м. Обработка данных ГЛОНАСС с уточнением их бортовых эфемерид обеспечивает СКО 0.33 м / 0.27 м. Ошибки измерения угловой ориентации КА оценивались по величине остаточных невязок МНК. Использование предложенного метода позволило уменьшить СКО в 2.7 раза.

Метод повышения точности координатной обработки космических изображений на основе идентификации динамических моделей съёмки по опорной информации (Глава 2. Положение 2, выносимое на защиту). Критерием качества идентификации динамических моделей съёмки по опорной информации обосновано СКО ошибки предсказания. Её оценка проводилась на данных от системы «Электро-Л», в которой наблюдаются значимые суточно-

периодические флуктуации геометрии и её постепенный дрейф. На выборке из более чем 5000 сеансов съёмки анализировалось СКО ошибки для различных предсказателей. Ошибка без использования предсказателей составила 0.6 / 2 пикселя (по горизонтали / вертикали). Трехвходовый предсказатель снизил СКО до 0.2 / 0.2 пикселя, а дополнительное использование показаний термодатчиков уменьшило СКО до 0.17 / 0.15 пикселя.

Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных от систем глобального наблюдения Земли (Глава 3. Положение 3, выносимое на защиту). Качество наземной геометрической калибровки датчиков оценивалось по величине остаточных невязок. Количество идентифицированных опорных объектов в каждом канале составляло ~500000 (видимый диапазон) и ~49000 (инфракрасный диапазон). При совмещении сканов СКО невязок составило 0.1 пикселя для видимого диапазона и 0.2 пикселя для инфракрасного; при совмещении различных спектральных каналов СКО составило 0.2 пикселя.

Качество геопривязки по диску Земли оценивалось на модельных и реальных изображениях. В модельные изображения вносились заданные искажения, которые затем оценивались путем сравнения с модельными. СКО оценки углов крена и тангажа составили ~3 угл. сек. На реальных изображениях оценка точности геопривязки по диску Земли выполнялась путем сравнения с более точными данными после геопривязки по электронным картам. На годовом интервале съёмки КА «Электро-Л» (~17000 измерений) СКО геопривязки по диску Земли относительно карты составило ~0.45 пикселя.

Точность геопривязки по картам оценивалась на модельных данных на основе изображений КА серий «MeteoSat» и «Метеор-М». Эти изображения сами по себе имеют ошибки геопривязки. Для отдельных снимков исходная геопривязка уточнялась оператором по опорным точкам, тогда СКО геопривязки по картам составило ~0.15 пикселей. Без такого уточнения на суточной серии снимков получено СКО 0.2-0.5 пикселя.

На реальных данных КА «Электро-Л» точность геопривязки прогнозировалась по СКО остаточных невязок фрагментов карты и для серии изображений, полученных за год, составила ~0.15 пикселя.

Метод высокоточного определения рельефа местности для систем радиолокационного наблюдения Земли на основе интерферометрической обработки пар изображений с привлечением низкодетального опорного рельефа (Глава 4. Положение 4, выносимое на защиту). Точность оценки паразитного наклона интерферограммы до выполнения операции развертывания фазы оценивалась путем сравнения с классическим подходом, при котором вначале осуществляется развертывание фазы. Это сопоставление выполнено на натурной информации от КА RadarSat-2 и TerraSAR-X. Для серии интерферограмм с суммарным объемом ~15 миллиардов пикселей СКО разности оценок паразитного набега фазы и эффекта от мультипликативного коэффициента пересчета фазы в высоту не превысили 0.12π и 0.05π радиан соответственно. Такая точность является приемлемой, даже если наблюдаемые расхождения полностью обусловлены предложенным методом.

Точность определения высоты оценивалась на серии интерферограмм от зарубежных КА TerraSAR-X, RadarSat-2, COSMO-SkyMed. Критерием выступало СКО результата развертки от фазы опорного рельефа, полученной из глобальной ЦМР ALOSWorld 3D 30. В среднем на данных ~25 миллиардов пикселей предложенный метод выигрывает по СКО высоты в ~5 раз у лучшего альтернативного метода потоков минимальной стоимости (в усовершенствованной реализации пакета GAMMA SAR and Interferometry Software). Наибольший выигрыш достигается на материалах съёмки сложного рельефа.

Метод коррекции смаза и расфокусировки изображений (Глава 5. Положение 6, выносимое на защиту). Эффективность коррекции слабого смаза и расфокусировки оценивалась путем сопоставления оценок линейного разрешения на местности (ЛРМ), полученных по аттестованной методике для исходных и обработанных снимков. Так, для серии изображений КА «Аист-2Д» наблюдалось улучшение ЛРМ на ~16 %. Для гиперспектрометра КА «Ресурс-П» ЛРМ прибора с худшим разрешением улучшено на ~21 %.

Для сильного смаза и расфокусировки повышение разрешения оценивалось на основе сравнения «ширины» главного лепестка ФРТ изображений до и после коррекции. «Ширина» ФРТ характеризовалась по наилучшему и наихудшему направлениям на основе анализа собственных чисел матрицы ковариации ФРТ. При нештатном режиме функционирования КА «Ресурс-ДК» наблюдался смаз ~98 пикселей, ширина восстановленной ФРТ составила 6 пикселей, т.е. разрешение повышено в ~16 раз в направлении смаза. Для КА «Электро-Л» улучшение разрешения составило от 1.5 до 3.5 раза в зависимости от номера спектрального канала.

Метод объединения информации от $K \geq 2$ субпиксельно смещенных линеек фотоприёмников на основе теории неравномерной дискретизации (Глава 5. Положение 5, выносимое на защиту). Показано, что из-за эффекта «алиасинга» тут неприменимы известные методы оценки ЛРМ и ФРТ. Оценить степень повышения пространственного разрешения предложено на основе анализа СКО правой части системы (19). Показано, что известные методы объединения информации, основанные на перестановке пикселей и весового суммирования, не способны обеспечить нулевые невязки при геометрических искажениях. Например, для КА «Электро-Л» на краях изображения относительная величина невязок достигает 0.76, что означает отсутствие повышения пространственного разрешения. Предложенный метод обеспечивает строго нулевые невязки по всему полю изображения.

Реализация методов. Предложенные в работе методы, выносимые на защиту, теоретически обоснованы. Экспериментально на достаточно представительном статистическом материале показана их высокая эффективность в смысле повышения точности геометрической обработки.

Рассмотренные методы доведены до практической реализации в виде программных комплексов обработки данных от космических систем «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Электро-Л» и изделий специального назначения, которые в

настоящее время используются на различных центрах страны для создания стандартных информационных продуктов.

На базе полученных результатов проектируются средства высокоточной геометрической обработки данных для новых перспективных систем ДЗЗ «Арктика-М» и «Обзор-Р».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены системные связи и принципы функционирования современных космических систем ДЗЗ, а также цели и задачи геометрической обработки. Выявлены проблемные вопросы по точности обработки и определены направления научных исследований.

2. Разработан метод повышения точности навигационной информации спутника, основанный на предсказании навигационных измерений и идентификации динамической модели коррелированности ошибок. На данных КА «Ресурс-П», полученных за год, установлено, что при оперативной обработке точность определения координат КА повышается в ~ 6 раз в плане и ~ 16 раз по высоте, точность определения угловой ориентации КА в 2.7 раза.

3. Разработан метод повышения точности координатной обработки космических изображений на основе идентификации динамических моделей съёмки по опорной информации. Метод апробирован на более чем 5000 изображений от спутников серии «Электро-Л». В результате адекватного построения модели съёмки и обработки изображений ошибки геометрии уменьшены по горизонтали в 3.5 раза, а по вертикали в 13.5 раза.

4. Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных от систем глобального наблюдения Земли. Оно позволило достичь субпиксельной точности координатной обработки данных КА серии «Электро-Л» (до 0.2-0.5 пикселя).

5. Разработан метод высокоточного определения рельефа местности для систем радиолокационного наблюдения Земли на основе интерферометрической обработки пар изображений с привлечением низкодетального опорного рельефа. Оценка на данных от систем TerraSAR-X, RadarSat-2, COSMO-SkyMed (объём ~ 25 миллиардов пикселей) показала, что точность определения высоты повысилась в среднем в 5 раз.

6. Разработан метод коррекции смаза и расфокусировки изображений. Он прошел апробацию на натуральных данных от систем ДЗЗ «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Аист-2Д», «Электро-Л», а также от изделий специального назначения. В результате установлено, что метод позволяет повысить разрешение существенно искаженных снимков до 16 раз.

7. Предложен метод объединения информации от нескольких субпиксельно смещенных линеек фотоприёмников на основе теории неравномерной дискретизации. Эффективность метода строго доказана теоретически. Экспериментальная проверка метода, выполненная на данных КА серии «Электро-Л», подтвердила правильность выдвинутых теоретических результатов и их высокую эффективность.

8. Методы высокоточной геометрической обработки информации реализованы в виде программных комплексов, которые используются для обработки данных ДЗЗ от систем «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Электро-Л» и изделий специального назначения. Эти комплексы в настоящее время эксплуатируются на различных центрах страны для создания стандартных информационных продуктов. На основе полученных результатов в настоящее время создаются средства геометрической обработки данных от вновь проектируемых перспективных систем «Арктика-М» и «Обзор-Р».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 96 работ, в их числе 30 статей (28 по списку ВАК, в т.ч. 6 в базах Scopus и Web of Science), 2 коллективные монографии, 2 патента на изобретения, 11 свидетельств на программы для ЭВМ, тезисы и материалы международных и всероссийских конференций в количестве 51.

Основные работы, которые наиболее полно раскрывают положения, выносимые на защиту, приводятся ниже.

Статьи в изданиях по списку ВАК (которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования)

1. Egoshkin N.A., Ereemeev V.V. Increasing satellite imagery resolution by fusion of data from multiple spatially shifted CCDs: a spectral-based approach // Remote Sensing Letters. 2015. Vol. 6. No. 2. Pp.116-124.

2. Gektin Y.M., Egoshkin N.A., Ereemeev V.V., Moskatinyev I.V., Smelyanskiy M.B. Basic Geometric Support of Systems for Earth Observation from Geostationary and Highly Elliptical Orbits // Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics. 2016. No. 53(9). Pp. 1142-1154.

3. Egoshkin N.A., Gektin U.M., Kuznetcov A.E., Kochergin A.M. Prelaunch photogrammetric calibration of russian satellite Elektro-I imagery instruments // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives 41. 2016. Pp. 161-163.

4. Makarenkov A., Egoshkin N., Ereemeev V. Modular transfer function compensation for hyperspectral data from Resurs-P satellite system // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV. 2018. Vol. 10789. Pp. 301-307.

5. Egoshkin N., Ereemeev V., Kuznetcov A., Solovyev V., Kochergin A. Standard image products of Russian highly elliptical remote sensing system “Arktika-M” // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV. 2018. Vol. 10789. Pp. 430-436.

6. Egoshkin N.A., Ereemeev V.V. Normalization of images from geostationary Earth remote sensing systems // The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering. WCSE 2015-IPCE. 2015. Pp. 128-131.

Статьи в изданиях по списку ВАК

7. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Координатная привязка изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли // Вестник РГРТУ. 2007. №22. С. 10-16.

8. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П., Москатиньев И.В., Москвитин А.Э. Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по контуру диска Земли и электронным картам // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. М.: ИКИ РАН, 2009. Вып. 6. Том. 1. С. 132-138.

9. Гектин Ю.М., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Москатиньев И.В., Смелянский М.Б. Базовое геометрическое обеспечение систем наблюдения Земли с геостационарных и высокоэллиптических орбит // Исследование Земли из космоса. 2016. №6. С. 68-81.

10. Егошкин Н.А., Еремеев В.В. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения Земли // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4. С. 28-32.

11. Егошкин Н.А., Еремеев В.В. Современные подходы к повышению качества изображений от многоэлементных систем наблюдения Земли // Радиотехника. 2016. №8. С. 98-103.

12. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки Земли // Вестник РГРТУ. 2017. № 60. С. 54-64.

13. 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.

14. Воронин А.А., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москатиньев И.В. Геометрическая обработка данных космических систем глобального наблюдения Земли // Вестник РГРТУ. 2009. №1. С. 12-17.

15. Егошкин Н.А. Обработка бортовой навигационной информации для высокоточной оперативной коррекции космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2017. №4. С. 23-29.

16. Егошкин Н.А. Коррекция смаза и расфокусировки спутниковых изображений с учетом геометрических искажений // Цифровая обработка сигналов. 2016. №3. С. 37-41.

17. Егошкин Н.А. Динамические модели геометрической обработки изображений в системах дистанционного зондирования Земли // Цифровая обработка сигналов. 2017. №1. С. 3-7.

18. Егошкин Н.А., Москвитин А.Э. Повышение точности коррекции изображений на основе фильтрации измерений углового положения сканирующего зеркала // Вестник РГРТУ. 2010. №3. С. 7-11.

19. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Эффективная организация массовых координатных преобразований при геометрической обработке радиолокационных изображений // Цифровая обработка сигналов. 2018. №3. С. 16-20.

20. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Комплексирование изображений от линеек фотоприёмников в условиях геометрических искажений // Цифровая обработка сигналов. 2012. №3. С. 40-44.

21. Гектин Ю.М., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Зенин В.А., Москатиньев И.В. Нормализация изображений от геостационарной космической системы наблюдения Земли // Цифровая обработка сигналов. 2011. №3. С. 28-31.

22. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы // Вестник РГРТУ. 2015. № 54-2. С. 21-31.

23. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Вестник РГРТУ. 2015. №1. С. 72-79.

24. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Комплексование цифровых моделей рельефа с целью повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2017. №1. С. 13-17.

25. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 208-219.

26. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Уточнение пространственной базы при космической бистатической радиолокационной съемке Земли по сигналу интерферограммы // Цифровая обработка сигналов. 2016. №3. С. 42-48.

27. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развертывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съемки Земли // Радиотехника. 2016. №11. С. 120-127.

28. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Макаренков А.А. Комплексование гиперспектральных снимков Земли, полученных в различных спектральных диапазонах // Цифровая обработка сигналов. 2015. №3. С. 3-7.

Коллективные монографии

29. Антонушкина С.В., Гуров В.С., Егошкин Н.А. и др. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под. ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.

30. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 320 с.

Патенты

31. Способ развертывания фазы при интерферометрической обработке информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли: пат. 152612322 РФ: МПК G01S 13/90 / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». № 2016113159; заявл. 07.04.2016; опубл. 07.03.2017. Бюл. № 7.

32. Способ компенсации функции передачи модуляции пространственно и спектрально перекрывающихся изображений, одновременно формируемых системой дистанционного зондирования Земли: пат. 2619820 РФ: МПК G01V3/00 / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.А. Макаренков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». № 2016117131; заявл. 29.04.2016; опубл. 18.05.2017. Бюл. № 14.

Егошкин Николай Анатольевич

**МЕТОДЫ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ ОТ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.