

На правах рукописи



МОСКВИТИН Алексей Эдуардович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (РГРТУ) в НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон» РГРТУ)

Научный консультант: **Еремеев Виктор Владимирович**
д.т.н., директор НИИ обработки аэрокосмических изображений РГРТУ (г. Рязань)

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)

Фурсов Владимир Алексеевич
д.т.н., зав. кафедрой суперкомпьютеров и общей информатики, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара)

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

Ведущая организация: ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук» (г. Владивосток)

Защита состоится **6 октября 2021 года в 11:00** на заседании диссертационного совета 24.2.375.01 (Д 212.211.01) в РГРТУ по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

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

Автореферат разослан _____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



**Прузцов
Александр Викторович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют выполнить космическое наблюдение заданных участков земной поверхности в видимом, тепловом, радиолокационном диапазонах спектра; в режимах многозональной и гиперспектральной съемки; при различных способах поляризации излучаемого и принимаемого радиолокационного сигнала. После наземной обработки данные ДЗЗ находят эффективное применение в различных отраслях народного хозяйства и в интересах обороны страны. Федеральными космическими программами и Гособоронзаказами определены приоритетные направления развития в России космической группировки систем ДЗЗ и создание эффективной наземной инфраструктуры приема, обработки и доставки потребителям получаемой информации.

Россия пока отстает в области ДЗЗ от мирового уровня. Это прежде всего касается систем высокодетального (с разрешением порядка 0,3 метра) наблюдения земной поверхности в видимом и радиолокационном диапазонах, гиперспектральной съемки, систем глобального наблюдения Земли на фоне окружающего космоса в видимом и тепловом диапазонах. В рамках государственных документов по развитию космической деятельности поставлена цель восстановить паритет России в области ДЗЗ, а по ряду тактико-технических характеристик превзойти мировой уровень, основываясь на использовании исключительно отечественной элементной базы.

Одним из эффективных подходов к решению проблемы повышения четкости и дешифрируемости объектов наблюдаемой сцены является комплексирование информации от различных по принципу действия и назначению систем ДЗЗ. Под комплексированием далее будем понимать процесс объединения информации от нескольких разнородных снимков земной поверхности с целью формирования нового изображения, на котором объекты наблюдаемой сцены отображаются с более высокой четкостью по сравнению с исходными снимками.

Проблема повышения геометрической разрешающей способности космической съемки традиционно решается на технологическом уровне – путем создания приборов с зарядовой связью (ПЗС-линеек и ПЗС-матриц) с увеличенным числом фотоприемных элементов. Это радикальный, но достаточно трудный и продолжительный процесс. Россия в этом направлении отстает. Например, ПЗС-линейки отечественного производства для видимого диапазона насчитывают 2 тыс. фотоприемных элементов, а зарубежные - 20 тыс.; для теплового диапазона в России созданы линейки из 192 приемников инфракрасного излучения, а за рубежом - линейки с 1500 приемниками.

В сложившихся условиях наряду с технологическим подходом в России создаются новые конструкции датчиков, в которых в каждом спектральном канале устанавливаются несколько отечественных ПЗС-линеек с субпиксельным смещением полей зрения. За счет комплексирования изображений от нескольких ПЗС-линеек можно значительно повысить пространственное разрешение результатов космической съемки.

При использовании обычных конструкций сканерных устройств, в которых ПЗС-линейки отдельных спектральных каналов устанавливаются в фокальной плоскости телескопа друг за другом без смещения полей зрения, есть возможность повысить четкость отображения объектов наблюдаемой сцены за счет комплексирования разносектральных субпиксельно смещенных изображений. Особенно эта возможность может быть более эффективно реализована в системах гиперспектральной съемки Земли.

Актуальной задачей является повышение информативности спутниковых снимков за счет комплексирования разнородной видеоинформации, зафиксированной в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах спектра. Объединение таких данных потенциально позволяет сформировать изображение видимого диапазона с качественно новыми свойствами, например, отображая на естественном для человеческого зрения фоне замаскированные объекты, хорошо заметные на радиолокационных снимках.

Исследованию и решению этих актуальных вопросов посвящена настоящая диссертационная работа.

Степень разработанности темы. Интуитивно, комплексирование информации от различных систем ДЗЗ представляется как вполне разумный подход, нацеленный на повышение точности оценки геометрических, радиометрических и спектральных характеристик объектов наблюдаемой сцены. В то же время общей теоретической основы для решения этой проблемы нет. По результатам анализа зарубежной и отечественной литературы в этой области можно сделать следующие выводы.

Проблема комплексирования видеоинформации от самых различных систем космического наблюдения Земли активно решается в нашей стране и за рубежом. Она нацелена на улучшение радиометрического и геометрического качества изображений, повышение их информативности, четкости отображения объектов наблюдаемой сцены и их дешифрируемости.

В России эта проблема исследуется известными фирмами ракетно-космической промышленности, создающими системы ДЗЗ с привлечением широкой кооперации, - это Самарский Ракетно-космический центр «Прогресс»; НПО им. С.А. Лавочкина; Корпорация «ВНИИЭМ»; НПО машиностроения; корпорация «Энергия»; Корпорация «Российские космические системы» и входящий в нее Научный центр оперативного мониторинга Земли, НИИ точных приборов, НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского, Институт космических исследований РАН, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Институт систем обработки изображений РАН, ЦНИИ машиностроения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева, МГУ, МФТИ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, НГТУ, ЮЗГУ, УлГТУ, РГРТУ им. В.Ф.Уткина, Госцентр «Природа» и др.

По зарубежным публикациям можно выделить ведущие фирмы, работающие над рассматриваемыми проблемными вопросами: Lockheed Martin, GeoEye, DigitalGlobe, Ball Aerospace (США), Airbus Defence & Space, Spot Image (Евросоюз), Лаборатория реактивного движения, США (Space Shuttle); Немецкий

центр авиации и космонавтики (КА TerraSAR-X, TanDEM-X); Европейское космическое агентство (КА ERS-1,2, ENVISAT, Sentinel-1A,1B) и др.

Работы ученых и специалистов в рассматриваемой области служат теоретической базой для проведения исследований в настоящей диссертации.

По результатам анализа работ по проблеме комплексирования разнородных изображений можно сделать следующие выводы.

Во-первых. В отечественных и зарубежных публикациях слабо отражены вопросы повышения пространственного разрешения систем ДЗЗ на основе комплексирования субпиксельно смещенных изображений, формируемых отдельными ПЗС-линейками. За рубежом эта задача менее актуальна, поскольку она решается путем технологического увеличения количества фотоприемных элементов в ПЗС-линейках. В нашей же стране в условиях технологического отставания в создании многомерных оптоэлектронных ПЗС-линеек и матриц, а также действия санкций на поставку зарубежной микроэлектроники, подобные технологии являются перспективными для развития.

Во-вторых. В зарубежных и отечественных системах обработки изображений используются различные подходы комплексирования многозональных и гиперспектральных видеоданных для повышения четкости отображения объектов наблюдаемой сцены. Эти подходы основаны на усреднении, поиске максимума, на степенном преобразовании, на использовании весовых функций, на выделении главных компонент, на вейвлет-преобразовании, на высокочастотной фильтрации, на сингулярном разложении, на поиске оптимального индексного коэффициента. Такие решения требуют точной настройки алгоритмов, они эффективно работают только в узкой области - это, например, обработка телевизионных изображений, снимков от бытовых и профессиональных фотоаппаратов и т.п., и не учитывают специфику космических систем наблюдения Земли.

В-третьих. За рубежом приоритетным направлением является создание космических систем наблюдения Земли в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах спектра. В России также активно ведутся разработки в этом направлении. В научных публикациях в части комплексирования разнородной видеоинформации применяются методы простого и диффузного морфологического комплексирования, строятся пирамиды изображений и др. Однако такие подходы, как правило, требуют проведения предварительной сегментации изображений, что делает их сложными в реализации и узконаправленными.

В-четвертых. В отечественных и зарубежных источниках используют различные критерии оценки эффективности комплексирования изображений. Это в первую очередь критерии, показывающие степень качественного отличия скомплексированного снимка от исходных: дисперсия разности, коэффициент корреляции и др. Для оценки информативности изображений используют энтропию и анализ спектра Фурье. Однако в научных публикациях отсутствуют описания подробных схем и результатов оценки эффективности комплексирования разнородной видеоинформации при решении задач повышения пространственного разрешения и сегментации объектов интереса.

Таким образом, проблема комплексирования далека от своего разрешения, необходимы новые научные исследования по выделенным выше направлениям.

Цель диссертации состоит в разработке новых методов и алгоритмов повышения четкости и дешифрируемости объектов наблюдаемой сцены на основе комплексирования разнородной видеоинформации от современных систем ДЗЗ.

Задачи. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- разрабатываются подходы к комплексированию изображений от нескольких субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, выполняется оценка их эффективности с точки зрения повышения разрешающей способности;
- разрабатываются методы и алгоритмы комплексирования геометрически совмещенных многозональных и гиперспектральных видеоданных с целью повышения четкости отображения объектов наблюдаемой сцены;
- предлагаются подходы к комплексированию видимых, тепловых и радиолокационных спутниковых снимков с целью получения более информативных продуктов для восприятия человеческим зрением;
- проводится оценка эффективности разработанных методов и алгоритмов на основе представительной статистической выборки данных от современных отечественных и зарубежных систем ДЗЗ.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней предложены и исследованы новые методы и алгоритмы повышения пространственного разрешения, четкости и дешифрируемости объектов земной поверхности на основе комплексирования данных от систем ДЗЗ видимого, теплового и радиолокационного диапазонов спектра, полученных с различным пространственным, радиометрическим и спектральным разрешением.

На защиту выносятся следующие новые научные положения и результаты.

1. Метод комплексирования изображений от нескольких идентичных субпиксельно смещенных ПЗС-линеек (работающих в одном и том же спектральном диапазоне), основанный на алгебраическом подходе объединения данных и позволяющий повысить пространственное разрешение материалов космической съемки для двух линеек в 1,6 раза, для трех линеек в 1,9 раза, для четырех линеек в 2,5 раза.

2. Метод комплексирования разноспектральной видеоинформации от субпиксельно смещенных ПЗС-линеек в условиях геометрических искажений снимков в процессе их формирования. Метод основан на яркостной интерполяции отсчетов в нерегулярной решетке дискретизации с учетом инверсных областей изображений в различных спектральных диапазонах. Метод позволяет, например, для 2-х ПЗС-линеек повысить пространственное разрешение материалов съемки примерно в 1,4 раза.

3. Метод комплексирования геометрически совмещенных разноспектральных снимков, основанный на стохастической модели космических изображений Земли. Метод позволяет строго математически описать процесс идентификации инверсных областей на совмещаемых снимках и с учетом этого корректно выполнить их объединение.

4. Алгоритмы комплексирования разноспектральных изображений видимого диапазона, основанные на усилении их отличительных особенностей и

обеспечивающие при объединении 3-х снимков повышение четкости отображения объектов наблюдаемой сцены не менее чем на 25 % (по критерию энтропии) по отношению к наиболее информативному исходному снимку.

5. Метод объединения изображений с существенно различными пространственным и спектральным разрешениями, позволяющий получить новое изображение с высоким пространственным разрешением и более точными спектральными характеристиками (по сравнению с известными технологиями Pansharpening).

6. Алгоритмы комплексирования оптических снимков с данными радиолокационного и теплового наблюдения Земли на основе независимой обработки высоко- и низкочастотных компонент изображений, позволяющие повысить информативность результата комплексирования по сравнению с исходными снимками примерно на 30 % (по частотному и энтропийному критериям).

7. Алгоритм повышения четкости отображения объектов на радиолокационном изображении путем комплексирования материалов съемки с различных точек наблюдения Земли, основанный на использовании математического аппарата нечеткой логики.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что в ней выполнен системный анализ проблемы комплексирования разнородной видеоинформации от современных систем ДЗЗ с целью повышения четкости и дешифрируемости объектов наблюдаемой сцены и созданы на этой основе программные средства наземной обработки спутниковых данных.

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

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 результаты исследований, выполненные в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина (НИИ «Фотон» РГРТУ) в рамках создания и эксплуатации космических систем ДЗЗ «Ресурс-О1», «Ресурс-П», «Аист-2Д», «Электро-Л», а также при проектировании новых перспективных систем «Арктика-М», «Обзор-Р», «Аист-2Т» и др. Разработка этих космических систем определена Федеральными космическими программами на 2006 - 2015 и 2016 - 2025 годы и Гособоронзаказами. При создании наземных средств обработки данных ДЗЗ в рамках указанных систем соискатель принял участие в выполне-

нии 17 ОКР по заказам предприятий ракетно-космической промышленности. Результаты диссертационной работы в виде ряда программных комплексов получили эффективное внедрение, что подтверждается Актами от ведущих предприятий ракетно-космической отрасли России, специализирующихся в области космических исследований Земли:

- АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»,
- АО «НПО Лавочкина»,
- АО «Российские космические системы»,
- ФГБУ «НИЦ «Планета».

Результаты выполненных исследований использованы также в учебном процессе РГРТУ. Акты приведены в приложении к диссертации.

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

- на международных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 1999, 2010), «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 1999, 2001, 2002, 2005, 2008, 2010), «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015), «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2000, 2003, 2007, 2013, 2017), «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2020);

- на всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2005, 2006, 2009, 2012-2014, 2016), «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2011, 2019), «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2009, 2013), «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2013), «Гиперспектральные приборы и технологии» (Красногорск, 2013), «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 1999-2002, 2007, 2009-2012, 2017), «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула, 2007, 2009).

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-О1», «Ресурс-П», «Электро-Л», «Аист-2Д» и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 108 работ, в том числе: 30 статей (21 в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК); 2 коллективные монографии; 2 патента на изобретение; 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ; 4 отчета о НИР, прошедших Госрегистрацию; 62 тезиса докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и приложения. Ее объем составляет 273 страниц, в том числе 166 страниц – основное содержание, 66 страниц – рисунки и таблицы, 33 страниц – список литературы, 8 страниц – приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ проблемы комплексирования разнородных изображений от современных систем космического наблюдения Земли

В этой главе представлен анализ подходов к комплексированию изображений от различных по принципу действия и характеристикам систем дистанционного зондирования Земли с целью получения на этой основе новых изображений, отличающихся от исходных более высокими параметрами отображения объектов наблюдаемой сцены.

Конкретно в главе 1 рассмотрены:

- технологии комплексирования данных от систем наблюдения, использующих несколько субпиксельно смещенных ПЗС-линеек;
- алгоритмы и технологии комплексирования разноспектральных изображений с целью повышения детальности отображения объектов наблюдаемой сцены;
- методы и алгоритмы комплексирования данных гиперспектральной съемки Земли;
- подходы по комплексированию материалов космической съемки в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах спектра.

На основе проведенного анализа отечественных и зарубежных публикаций в области комплексирования разнородной информации от систем ДЗЗ сделан вывод, что известные алгоритмы и методы не позволяют в полном объеме решить эту задачу. В связи с этим определена необходимость проведения новых научных исследований по следующим основным направлениям.

1-е направление – это комплексирование изображений от нескольких субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, позволяющее многократно повысить пространственное разрешение материалов космической съемки. Эти вопросы рассмотрены в главе 2.

2-е направление – это комплексирование геометрически совмещенных снимков, полученных в различных диапазонах видимого участка спектра. Здесь ставится задача формирования нового снимка с повышенной четкостью отображения объектов земной поверхности. Эти вопросы рассмотрены в главе 3.

3-е направление – это комплексирование изображений, сформированных в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах спектра. Объединение таких совершенно разнородных данных нацелено на получение снимка, в котором отображаются с высокой четкостью элементы, хорошо наблюдаемые в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах. Эти вопросы рассмотрены в главе 4.

4-е направление – связано с оценкой эффективности предлагаемых методов комплексирования изображений от различных систем ДЗЗ. Эти вопросы рассмотрены в главе 5.

Глава 2. Комплексирование субпиксельно смещенных изображений с целью повышения разрешающей способности съемки

В этой главе формулируются и исследуются два метода комплексирования данных от нескольких ПЗС-линеек, установленных в фокальной плоскости видеодатчика с субпиксельным смещением полей обзора. Результаты исследований этой главы составляют основу *Положения 1* и *Положения 2*, выносимых на защиту.

Разработан метод комплексирования изображений, полученных от идентичных субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, работающих в одном и том же спектральном диапазоне (*Положение 1*, выносимое на защиту) [1-3,19,22].

В качестве примера рассмотрим случай комплексирования данных от двух ПЗС-линеек, одноименные фотоэлементы которых смещены на 0,5 пикселя (рис. 1). На этом рисунке: (X_1, X_3, \dots) - отсчеты от 1-й ПЗС-линейки; (X_2, X_4, \dots) - отсчеты от 2-й ПЗС-линейки; (y_1, y_2, y_3, \dots) - отсчеты результата комплексирования.

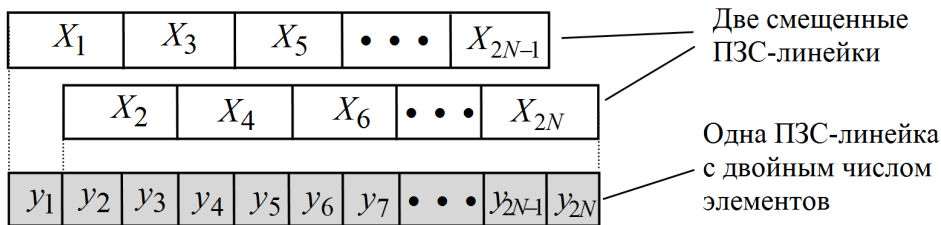


Рис. 1. Две ПЗС-линейки со смещением полей зрения на 0,5 пикселя

Субпиксельное смещение полей зрения ПЗС-линеек позволяет получить изображение в более частой решетке дискретизации, т.е. с более высоким пространственным разрешением.

В основу метода положена модель виртуального датчика, которая предполагает, что ПЗС-линейки формируют изображение в одном и том же спектральном диапазоне; в пределах области каждого фотоэлемента его светочувствительность (функция рассеивания точки) постоянна; отсутствуют геометрические искажения сцены, наблюдаемой каждой ПЗС-линейкой; фотоприемники в каждой ПЗС-линейке технологически идеально точно установлены на общей подложке, а линейки идеально смещены друг относительно друга в фокальной плоскости.

В работах [1-3] показано, что оценить y_k по отсчетам X_k можно по формуле

$$\hat{y}_k = 2 \sum_{i=1}^{k-1} (-1)^i X_{k-i} + (-1)^{k-1} X_1, \quad k = \overline{1, 2N}, \quad (1)$$

где отличие \hat{y}_k от y_k обусловлено ошибкой определения значения начального элемента y_1 . Эту ошибку можно исправить, если потребовать, чтобы среднее значение четных элементов последовательности \hat{y}_k было бы равно среднему значению нечетных.

Получено выражение для оценки искомых отсчетов y_k для общего случая комплексирования данных от K ПЗС-линеек:

$$y_k = K \sum_{i=0}^{Z_k-1} (X_{k+1-K(1+i)} - X_{k-K(1+i)}) + \sum_{j=1}^{K-1} \varphi_{kj} X_j, \quad (2)$$

где $\varphi_{kj} = -1, 1, 0$ соответственно при $(k-K \cdot Z_k) = 0, j, \neq j; Z_k = \text{ent}(k/K)$.

Формула (2) получена в предположении, что исходные отсчеты яркости X_k не имеют ошибок измерения. На практике для обработки доступны лишь оцифрованные значения отсчетов X_k , которые содержат ошибки квантования ξ_k . С учетом этих ошибок получен аналог формулы (2) для случая комплексирования данных от K линеек:

$$y_k = K \sum_{i=0}^{Z_k-1} (X_{k+1-K(i+1)} - X_{k-K(i+1)}) + \sum_{j=1}^{K-1} \varphi_{kj} X_j + \\ + K \sum_{i=0}^{Z_k-1} (\xi_{k+1-K(i+1)} - \xi_{k-K(i+1)}) + \sum_{j=1}^{K-1} \varphi_{kj} \xi_j. \quad (3)$$

Предложена процедура коррекции ошибок квантования. Она основана на учете периодического характера их изменения и включает два этапа. На первом этапе коррекция выполняется с помощью полиномов, рассчитанных по методу наименьших квадратов. Например, для случая комплексирования данных от двух ПЗС-линеек:

$$y'_k = \hat{y}_k + (-1)^k 0.5(P_H - P_Q), \quad k = \overline{1, 2N}, \quad (4)$$

где P_H и P_Q - полиномы, вычисленные по данным от 1-й и 2-й ПЗС-линеек, т.е. по X_k с нечетными и четными индексами. Второй этап коррекции связан с восстановлением соотношения $X_k = 0.5(y_k + y_{k+1})$ (см. рис. 1). Для этого формируются скорректированные значения отсчетов изображения:

$$y''_k = y'_k + \alpha, \quad y''_{k+1} = y'_{k+1} + \alpha, \quad k = 1, 3, 5, \dots, \quad (5)$$

где $\alpha = X_k - 0.5(y'_k + y'_{k+1})$. Показано, что в идеальном случае, при полной компенсации ошибок квантования, комплексирование данных от K линеек дает повышение разрешающей способности съемки в K раз.

Экспериментально установлено, что в условиях действия шумов квантования при комплексировании данных от двух ПЗС-линеек, смещенных на $1/2$ пикселя, достигается повышение разрешающей способности съемки в 1,6 раза, а при комплексировании данных от трех ПЗС-линеек, смещенных на $1/3$ пикселя, - в 1,9 раза. На рис. 2 приведен пример комплексирования данных от трех линеек, смоделированных по изображению от КА «Ресурс-П».



Рис. 2. Алгебраическое комплексирование видеоданных от КА «Ресурс-П»
(слева - снимок от одной ПЗС-линейки,
справа - результат комплексирования данных от трех линеек)

Разработан метод комплексирования разномасштабной видеоинформации от субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, когда: исходные изображения геометрически искажены друг относительно друга и функция рассеивания точки фотоприемников имеет нелинейный характер, а ее область определения шире размеров фотоприемников (*Положение 2, выносимое на защиту*) [10,12,20]. В этом случае комплексироваться отсчеты нескольких изображений в нерегулярной решетке пространственной дискретизации, а функции рассеяния точки рядом расположенных пикселей перекрываются.

Для простоты понимания рассмотрим одномерный случай, когда пиксель реальной ПЗС-линейки в направлении ее расположения в фокальной плоскости датчика в N раз больше пикселя «виртуальной» линейки. Тогда связь между дискретным сигналом y_i от идеальной «виртуальной» линейки и исходным

сигналом X_i описывается выражением (см. рис. 1): $y_{j+N-1} = X_j - \sum_{d=0}^{N-2} y_{j+d}$, кото-

рое определяет y_j при $j \geq N-1$ с точностью до $(N-1)$ неизвестных начальных условий вида y_0, y_1, \dots, y_{N-2} . Эти условия находятся во взаимно однозначном соответствии с «потерянными» сигналами, для которых отклик $X_i \equiv 0$. На практике начальные условия определяются по критерию минимума энергии восстановленного изображения: $\|y_j\| \rightarrow \min$. Тогда искомым сигналом вычисляется

как $y_j = y'_j - \sum_{s=1}^{N-1} \alpha_s y_j^s$, где y'_j - сигнал для нулевых начальных условий;

$\alpha_s, s = \overline{1, N-1}$, - коэффициенты, определяемые из условия $\|y_j\| \rightarrow \min$.

При сканерной съёмке разные линейки фотоприёмников фиксируют данные в разное время. Это приводит к тому, что субпиксельные сдвиги зависят от скорости и направления «бега» изображения в фокальной плоскости датчика.

Если отсчеты исходных видеоданных образуют нерегулярную решетку, процесс комплексирования значительно усложняется. Неравномерность расположения отсчетов обязательно должна учитываться при интерполяции. Известны обобщения теоремы Котельникова на этот случай. Однако на практике удобнее использовать полиномиальную интерполяцию. Для фиксированной координаты x_0 необходимо построить полином $P(x)$ степени $2N-1$, удовлетворяющий системе $2N$ уравнений $P(k + \tau_n) = D_n(k)$, $|k + \tau_n - x_0| < 1$. Тогда интерполированная яркость в точке x_0 находится как $P(x_0)$.

Также рассмотрен важный случай интерполяции в параллелограммной решетке дискретизации, который можно характеризовать как кусочно-линейное приближение полиномиальной интерполяции. Особенностью параллелограммной решетки является то, что ее можно задать бесконечным количеством пар векторов, образующих параллелограмм в окрестности искомой точки. Показано, что наилучшее решение дает параллелограмм, имеющий наименьший периметр. Предложен алгоритм поиска наилучшего параллелограмма.

Разработан алгоритм интерполяции в спектральной области, основанный на «подавлении спектральных зон» [12,20,22]. Пусть изображение S имеет конечный спектр: $S(\omega, \xi) = 0$ для $(\omega, \xi) \notin \Omega$, где функции (ω, ξ) – спектр Фурье соответствующих функций, Ω – носитель спектра. Необходимо найти фильтры h_n , $n = \overline{1, N}$, чтобы восстановить изображение по дискретным отсчетам:

$$S(\omega, \xi) = \sum_n h_n(\omega, \xi) S_{\perp n}(\omega, \xi). \quad (6)$$

Обозначим $U(\omega, \xi) = \{(k, l) : (\omega - 2\pi k, \xi - 2\pi l) \in \Omega\}$ – множество перекрывающихся спектральных зон, $z_n = e^{-i2\pi\tau_n}$, $w_n = e^{-i2\pi\eta_n}$. Разобьем Ω на поддиапазоны Ω_d так, что бы в пределах каждого Ω_d множества перекрывающихся зон были одинаковыми: $U(\omega, \xi) = U_d$ при $(\omega, \xi) \in \Omega_d$, где d – индекс поддиапазона. Восстановление по (6) возможно тогда и только тогда, когда для каждого d относительно неизвестных $h_{n,d}$ разрешима система линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_n h_{n,d} z_n^k w_n^l = \delta_{0,k} \delta_{0,l}, \quad (k, l) \in U_d. \quad (7)$$

При этом $\varepsilon_d = \sum_n |h_{n,d}|^2$ характеризует усиление шума в Ω_d . Поэтому нормальным решениям системы уравнений соответствуют фильтры $h_n(\omega, \xi) = h_{n,d}$ при $(\omega, \xi) \in \Omega_d$, которые обеспечивают наилучшее отношение сигнал-шум при восстановлении изображения.

Проблемным вопросом при комплексировании разнесектральных изображений является идентификация инверсных областей, когда одноименные объекты на одном снимке отображаются более «светлыми», а на другом более «темными» по отношению к окружающему фону. Эта задача для пары произвольных изображений $B_i(m, n)$ и $B_j(m, n)$, которые предварительно геометриче-

ски совмещены, решается путем анализа их низкочастотных составляющих $B_{iH}(m, n)$, $B_{jH}(m, n)$ для каждого элемента (m, n) в апертуре $(2T + 1)$ с помощью корреляционной процедуры [2]:

$$V_{ij}(m, n) = \sum_{t=-T}^T [B_{iH}(m, n+t) - B_{iH}(m, n+t-1)] [B_{jH}(m, n+t) - B_{jH}(m, n+t-1)]. \quad (8)$$

Признак инверсии определяется отрицательным знаком $V_{ij}(m, n)$. Одно из изображений, например $B_i(m, n)$, принимается в качестве базового, а коррекция инверсии изображения $B_j(m, n)$ осуществляется путем изменения знака его высокочастотной компоненты.

Моделирование рассматриваемого метода осуществлялось следующим образом. Для набора геометрически совмещенных разноспектральных изображений $B_i(m, n)$, $i = \overline{1, S}$, определялось базовое изображение $B_s(m, n)$, $s \in \{1, 2, \dots, S\}$. Далее относительно базового снимка для остальных изображений вычислялся показатель (8) и выполнялась коррекция инверсии. После этого путем операции сдвига формировались модельные субпиксельно смещенные изображения и путем их объединения формировалось изображение в частой решетке дискретизации. С использованием выше описанных процедур восстановления изображения в регулярной решетке по нерегулярным отсчетам комплексированных изображений формировался итоговый снимок.

Выполнены экспериментальные исследования метода комплексирования путем моделирования субпиксельно смещенных разнозональных изображений с использованием натурной информации от КА «Ресурс-П», «Электро-Л», «Ресурс-О1», которые показали высокую эффективность предложенных решений. Например, для двух разноспектральных изображений от КА «Ресурс-П», смещенных на $1/2$ пикселя, достигается улучшение разрешающей способности примерно в 1,4 раза.

Разработана методика оценки качества процесса комплексирования, на основе которой получены численные оценки эффективности предложенных методов и алгоритмов. В рамках этой методики обосновано использование следующих критериев:

- *критерий разностный* основан на том, что при повышении разрешающей способности изображения возрастают амплитуды перепадов яркости между соседними элементами;

- *критерий СКО* основан на сопоставлении элементов скомплексированного снимка с элементами исходных изображений;

- *критерий корреляционный* основан на изменении корреляционных связей элементов изображений при изменении разрешающей способности;

- *критерий спектральный* основан на возрастании амплитуды высокочастотных составляющих спектра Фурье при росте разрешающей способности изображений;

- *критерий энтропии* основан на повышении информационной емкости изображения при увеличении его детальности.

Методика оценки качества процесса комплексирования включает 3 этапа.

1. Реальные снимки от различных систем ДЗЗ выступали в качестве идеального результата комплексирования A . По ним с помощью операций прореживания, расфокусировки и сдвига моделировались изображения C как результат съемки с худшим разрешением и с субпиксельным смещением ПЗС-линеек, т.е. формировались снимки C с априорно известной степенью ухудшения разрешения.

2. На основе сопоставления критериев качества γ_A и γ_C , найденных для A и C , делался вывод об адекватности их показаний. Установлено, что для оценки степени изменения разрешения наиболее точными критериями являются частотный (максимальная относительная ошибка оценки составила 3,7 %) и корреляционный (9,8 %).

3. Эффективность рассмотренных методов и алгоритмов комплексирования оценивалась путем сопоставления A и результата комплексирования.

Глава 3. Комплексирование разносектральных геометрически совмещенных изображений с целью повышения четкости отображения объектов наблюдаемой сцены

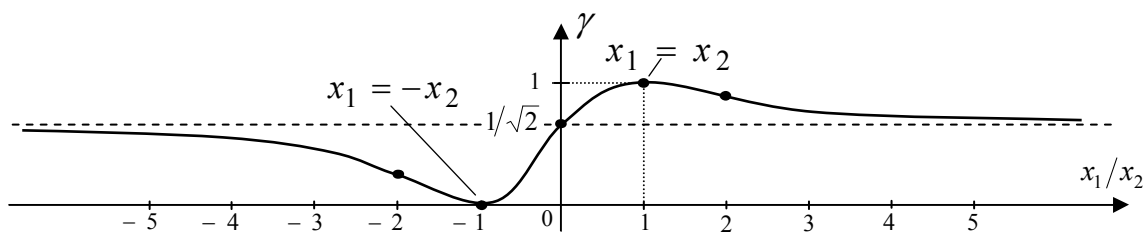
В этой главе представлены методы и алгоритмы комплексирования разносектральных изображений, которые предварительно геометрически совмещены с субпиксельной точностью. Результаты исследований составили основу *Положений 3-5, выносимых на защиту*.

Спектрональный принцип съемки создает предпосылки для повышения четкости представления объектов наблюдаемой сцены путем объединения разносектральных видеоданных. Для оценки степени различимости двух точек при панхроматической и спектрональной съемке введен параметр γ [22] как отношение длины вектора ℓ между яркостями двух точек в одномерном пространстве (панхроматическая съемка) к длине вектора d в K -мерном спектрональном пространстве, определяемое как

$$\gamma = \frac{\ell}{d} = \frac{1}{\sqrt{K}} \left| \sum_{k=1}^K x_k \right| / \sqrt{\sum_{k=1}^K x_k^2}, \quad \ell = \frac{1}{K} \left| \sum_{k=1}^K x_k \right|, \quad d = \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{\sum_{k=1}^K x_k^2}, \quad (9)$$

где x_k , $k = \overline{1, K}$, - проекция вектора между яркостями двух точек на k -ю спектрональную ось. По мере взаимной компенсации приращений спектрональных компонент $\ell \rightarrow 0$ и создаются наилучшие условия для комплексирования разносектральных данных. Для примера для случая двух спектральных каналов на рис. 2 приведен график $\gamma(x_1/x_2)$.

Из (9) и, в частности, из рис. 3 следует, что мера различимости спектрональных данных d всегда превосходит или, по крайней мере, равна ℓ , т.е. объекты на спектрональных снимках более различимы, чем на панхроматическом изображении. Отмеченный факт и создает предпосылку для получения по разносектральным данным некоего нового изображения, на котором по отношению к панхроматическому снимку более четко отображаются объекты наблюдаемой сцены.

Рис. 3. График $\gamma(x_1/x_2)$

Разработан метод комплексирования геометрически совмещенных разно-спектральных снимков, который основан на стохастической модели изображений, отражающей факт информационной зависимости сигналов в разных спектральных каналах [3]. Метод позволяет строго математически описать процесс идентификации инверсных областей на совмещаемых снимках и с учетом этого корректно выполнить их объединение (*Положение 3, выносимое на защиту*).

Обоснована стохастическая модель комплексирования в виде дифференциальной системы, которая, например, для двух изображений определяется как [22]

$$d\xi_1(t) = \theta(t) dt + \sigma_1 dw_1(t), \quad d\xi_2(t) = \theta(t) dt + \sigma_2 dw_2(t), \quad d\theta(t) = \sigma dw(t), \quad (10)$$

где $\xi_k(t)$, $k = 1, 2$, – яркостные функции (профили) в двух спектральных каналах вдоль строк изображения в зависимости от непрерывной пространственной координаты t , линейно связанной с ее дискретным аналогом – номером элемента в строке n ; $\theta(t)$ – яркостный профиль изображения, формируемый в результате комплексирования; $w_1(t)$, $w_2(t)$, $w(t)$ – независимые винеровские процессы; σ_1 , σ_2 , σ – соответственно параметры моделей совмещаемых изображений и результата их комплексирования.

В общем случае $\theta(t)$ и $\sigma(t)$ – это случайные функционалы, которые в отличие от обычных функций могут зависеть от всех значений процесса $\xi(t)$ и являться решением некоторого дифференциального уравнения. Коэффициент сноса $\theta(t)$ определяет степень детерминированного поведения $\xi(t)$, он характеризует неслучайную составляющую этого процесса. Коэффициент $\sigma(t)$ описывает степень случайности процесса $\xi(t)$ за счет «добавления» к нему независимого винеровского процесса $w(t)$. При отсутствии в последнем уравнении стохастической части $\sigma(t)dw(t)$ получается дифференциальное уравнение $d\xi(t) = \theta(t)dt$, его решением является функция. Стохастическая часть $\sigma(t)dw(t)$ играет роль случайного возмущения, влияющего на решение обычного дифференциального уравнения, переводя решение во множество функций.

Процесс комплексирования в этом случае сводится к оптимальной фильтрации $\theta(t)$ в виде $d\bar{\theta}(t)$ для каждой строки изображения, его интегрированию и приданию результату статуса соответствующей строки конечного изображения:

$$d\bar{\theta}(t) = \left(\sigma_1^{-2} (d\xi_1(t) - \bar{\theta}(t) dt) + \sigma_2^{-2} (d\xi_2(t) - \bar{\theta}(t) dt) \right) \sigma / \sqrt{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2}}, \quad (11)$$

т.е. реализуется процесс оценки функции спектральной яркости.

Непосредственным обобщением (10) является система, учитывающая определенные выше инверсные области в строке. Обозначим через $b(t)$ функцию, принимающую значение (-1) на инверсных участках и 1 на всех остальных. С использованием $b(t)$ система (10) модифицируется:

$$d\xi_1(t) = \theta(t)dt + \sigma_1 dw_1(t), \quad d\xi_2(t) = (\theta(t)b(t))dt + \sigma_2 dw_2(t), \quad d\theta(t) = \sigma dw(t).$$

В этом случае (11) преобразуется к виду:

$$d\bar{\theta}(t) = \left(\sigma_1^{-2} (d\xi_1(t) - d\bar{\theta}(t)) + \sigma_2^{-2} b(t) (d\xi_2(t) - (b(t)\bar{\theta}(t)) dt) \right) \sigma / \sqrt{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2}}.$$

При программной реализации метода переход от непрерывных яркостных профилей $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$, $\theta(t)$ к профилям дискретных изображений $B_1(m,n)$, $B_2(m,n)$ и результата их комплексирования $D(m,n)$ не представляет труда с учетом высокой плотности дискретных отсчетов на изображениях.

Рассмотренный подход легко обобщить для произвольного числа разноспектральных изображений, выбрав одно из них в качестве базового, используя рассмотренные выше критерии качества. Например, установлено, что по критерию энтропии качество скомплексированного изображения с использованием трех разноспектральных изображений (рис. 4) повышается более чем на 27 % по отношению к самому информативному из исходных снимков.

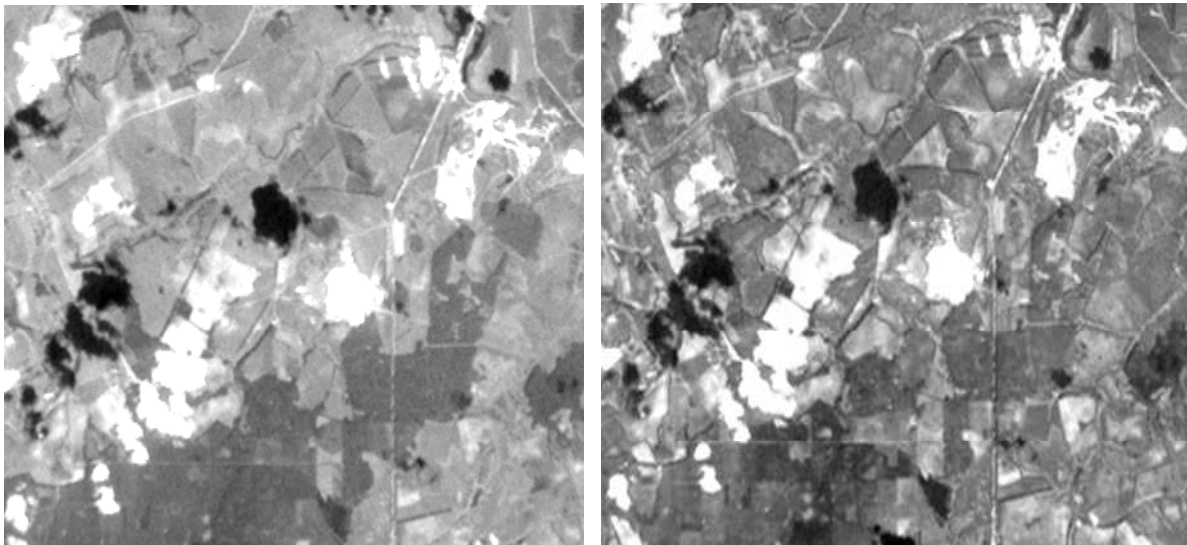


Рис. 4. Пример стохастического комплексирования

Разработаны два алгоритма комплексирования, основанные на учете отличительных признаков объединяемых разноспектральных изображений (*Положение 4, выносимое на защиту*) [1,22,26,27]. В первом алгоритме изображение отображается в многозональное пространство в виде некоторой области. Затем в этом пространстве осуществляется преобразование этой области так, что чем ближе точки располагаются к центральной линии области, тем сильнее они отодвигаются от нее. Благодаря этому достигается усиление спектральных различий. В результате вначале исходные изображения B_k , $k = \overline{1, K}$, преобразуются в B_k^o , $k = \overline{1, K}$, как

$$B_k^o(m, n) = \gamma(m, n)B_k(m, n) + \frac{1 - \gamma(m, n)}{K} \sum_{k=1}^K B_k(m, n), \quad k = \overline{1, K}. \quad (12)$$

Коэффициент $\gamma(m, n)$ определяет степень усиления различий в изображениях и вычисляется как $\gamma(m, n) = (\gamma_{\max} d_{\max}) / (d_{\max} + d(m, n)((\gamma_{\max}/\gamma_{\min}) - 1))$,

где $d(m, n) = \sqrt{\frac{2}{K(K-1)} \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K (B_i(m, n) - B_j(m, n))^2}$ - отклонение яркости обрабатываемой точки от биссектрисы в K -мерном пространстве; $\gamma_{\max} = \max_{m, n} \gamma(m, n)$; $\gamma_{\min} = \min_{m, n} \gamma(m, n)$; $d_{\max} = \max_{m, n} d(m, n)$. Результирующее изображение D формируется путем поэлементного суммирования B_k^o , $k = \overline{1, K}$.

Второй алгоритм основан на близкой идее. Здесь в качестве меры ценности $\gamma_k(m, n)$ спектрального отсчета принято его отличие от результата панхроматической съемки $B(m, n)$:

$$\gamma_k(m, n) = B_k(m, n) / B(m, n), \quad k = \overline{1, K}, \quad \text{где } B(m, n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_k(m, n).$$

Результирующее изображение D формируется на базе наиболее информативного исходного снимка $B^*(m, n)$, определенного по введенным выше показателям качества, с учетом меры $\gamma_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$. Эта процедура выполняется по формуле

$$D(m, n) = B^*(m, n) + B^*(m, n) \left(T(m, n) - \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(m, n) \right), \quad (13)$$

где $T(m, n) = \sqrt{\frac{2}{K(K-1)} \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K (\gamma_i(m, n) - \gamma_j(m, n))^2}$ - характеризует относительные спектральные отличия $B^*(m, n)$ от других $B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$.

Эксперименты показали, что комплексирование изображений по двум рассмотренным алгоритмам, основанным на усилении отличительных особенностей исходных снимков, обеспечивает повышение четкости отображения объектов наблюдаемой сцены. Например, при объединении 3-х снимков информативность итогового изображения повышается не менее чем на 25 % по спектральному и энтропийному критериям по отношению к исходному снимку наилучшего качества.

Часто системы ДЗЗ осуществляют съемку земной поверхности с высоким пространственным разрешением, но с ограниченным числом спектральных диапазонов, и одновременно съемку с низким пространственным и более высоким спектральным разрешением (например, с помощью гиперспектральной аппаратуры). Разработан метод объединения изображений с существенно различными пространственно-спектральными характеристиками, позволяющий получить новое изображение с более высокими пространственно-спектральными характеристиками (*Положение 5, выносимое на защиту*) [9,11,13,14].

Пусть для одного и того же участка Земли сформированы многозональное изображение низкого пространственного разрешения $B = \{B_{mnk}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}\}$ и изображение с многократно большим разрешением $D = \{D_{rsp}, r = \overline{1, R}, s = \overline{1, S}, p = \overline{1, P}\}$, где M, N и R, S - количество строк и столбцов изображений B и D , а K и P - число их спектральных каналов. При этом $R \gg M$, $S \gg N$, $K \gg P$. В данном случае одному элементу B_{mn} соответствует апертура \hat{D}_{mn} на D : $\hat{D}_{mn} = \{D_{rsp}, r = \overline{r_1, r_2}, s = \overline{s_1, s_2}, p = \overline{1, P}\}$, $r_1 = m\omega_C$, $r_2 = (m+1)\omega_C$, $s_1 = n\omega_K$, $s_2 = (n+1)\omega_K$, где ω_C, ω_K - отношение пространственных разрешений R_C и R_K снимков B и D соответственно в строчном и кадровом направлениях, т.е. $R_C = \omega_C N$, $R_K = \omega_K M$. На практике в апертуру \hat{D}_{mn} могут попадать десятки и сотни элементов изображения D .

Метод реализуется в виде последовательного выполнения следующих операций.

1. Формируется новое изображение $\overline{B} = \{\overline{B}_{mnp}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, p = \overline{1, P}\}$ путем приведения исходного B к спектральным диапазонам изображения D : $\overline{B}_{mnp} = \sum_{\lambda=\lambda_{p1}}^{\lambda_{p2}} \delta_p(\lambda) B_{mnh}(\lambda)$, где $\delta_p(\lambda)$ - спектральная передаточная характеристика, а $\lambda_{p1}, \lambda_{p2}$ - границы спектрального канала p снимка D .

2. Если все пиксели изображения D , входящие в апертуру \hat{D}_{mn} , схожи с пикселем \overline{B}_{mn} , то пиксель B_{mn} считается "чистым" (т.е. включающим один вполне определенный объект), а соответствующая ему спектральная характеристика (СХ) в виде вектора $B_{mn} = (B_{mnk}, k = \overline{1, K})$ заносится в список опорных СХ $S = \{S_i, i = \overline{1, I}\}$.

3. Формируется список уникальных опорных СХ $S^* = \{S_i^*, i = \overline{1, I^*}\}$ путем удаления из S всех дублирующихся СХ, $I^* \leq I$.

4. СХ S_i^* приводятся к спектральному разрешению высокодетального изображения D : $\overline{S}_i^* = (\overline{S}_{ip}^*, p = \overline{1, P})$, $\overline{S}_{ip}^* = \sum_{\lambda=\lambda_{p1}}^{\lambda_{p2}} \delta_p(\lambda) S_{ih}^*(\lambda)$, $i = \overline{1, I^*}$, где

$h(\lambda)$ - функция, ставящая в соответствие длине волны λ номер спектрального канала изображения B .

5. Для каждого \overline{B}_{mn} изображения \overline{B} анализируются пиксели в апертуре \hat{D}_{mn} путем сопоставления характеристики D_{rs} с опорными СХ \overline{S}_i^* , $i = \overline{1, I^*}$. В результате для каждой точки (m, n) изображения B формируются список опорных СХ S_{mni}^* , $i = \overline{1, I'}$, и список их процентных долей T'_{mni} , $i = \overline{1, I'}$, где T'_{mni} - количество точек в апертуре, для которых опорная СХ наиболее близка.

6. Формируется новое изображение $D^* = \{D_{rsk}^*, r = \overline{1, R}, s = \overline{1, S}, k = \overline{1, K}\}$ с пространственным разрешением высокодетального изображения D и со спектральным разрешением изображения B путем поиска для каждой точки D_{rs}^* наиболее близкого опорного спектра S_l^* .

7. Для учета ошибок определения опорных СХ рассчитываются мультипликативные коэффициенты коррекции γ_{rsk} в виде кусочно-линейной функции, построенной путем интерполяции по точкам, в которых отклонения СХ от реальной заранее известны.

8. Результирующее изображение D^{**} находится как $D_{rsk}^{**} = \gamma_{rsk} D_{rsk}^*$. В результате в узлах частой решетки изображения D формируется новое изображение D^{**} , обладающее высокими и пространственным и спектральным разрешениями.

Экспериментально подтверждена эффективность предложенного метода объединения изображений с существенно различными пространственным и спектральным разрешениями. Это решение защищено патентом РФ [24]. На рис. 5 представлен пример низкодетального гиперспектрального изображения (слева), высокодетального спектрального изображения с малым числом каналов (в центре) и результата их комплексирования (справа).

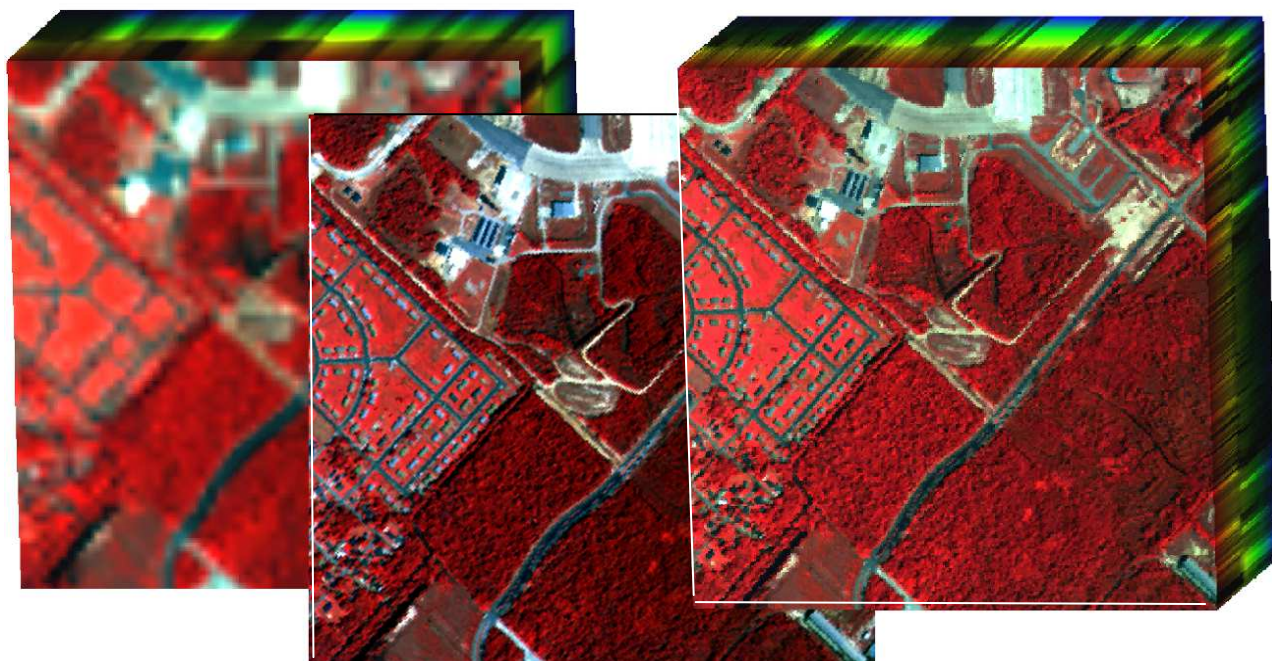


Рис. 5. Комплексирование изображений с различными пространственными и спектральными характеристиками

Глава 4. Комплексование данных от систем оптического, теплового и радиолокационного наблюдения Земли

В этой главе исследуются проблемные вопросы, связанные с объединением существенно разнородной оптической, тепловой и радиолокационной информации от современных систем ДЗЗ. При отсутствии необходимой теоретической основы для решения этой сложной трудноформализуемой задачи все же сделана попытка хотя бы на интуитивном уровне приступить к ее реализации.

Предложены и исследованы алгоритмы комплексования оптических снимков с данными радиолокационного и теплового наблюдения Земли. Они основаны на независимой обработке высоко- и низкочастотных компонент изображений (*Положение 6, выносимое на защиту*) [1-3,16,18,24,28].

Алгоритм комплексования разносектральной оптической видеоинформации. Низкочастотные составляющие комплексуемых изображений практически не различаются, а основные различия определяют высокочастотные компоненты. Алгоритм основан на разбиении исходных изображений на высоко- и низкочастотные компоненты: $B_k = B_{kH} + B_{kB}$, $k = \overline{1, K}$. Низкочастотные составляющие B_{kH} комплексуруются путем взвешенного суммирования, в результате формируется компонента итогового снимка:

$$D_H(m, n) = \sum_{k=1}^K \alpha_k(m, n) B_{kH}(m, n), \quad \alpha_k(m, n) = \frac{\Delta_k(m, n)}{\Delta_K(m, n)},$$

$$\Delta_k(m, n) = \sum_{i=1, i \neq k}^K |B_{kH}(m, n) - B_{iH}(m, n)|, \quad \Delta_K(m, n) = \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K |B_{iH}(m, n) - B_{jH}(m, n)|.$$

Коэффициенты $\alpha_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$, характеризуют уникальность пикселей B_{kH} : чем больше яркость пикселя одного изображения отличается от других, тем с большим весом он участвует в формировании элемента изображения $D_H(m, n)$.

Определение высокочастотной компоненты результирующего изображения D_B осуществляется по следующему правилу. Знак и модуль $D_B(m, n)$ определяются как

$$\text{Sign}(D_B(m, n)) = \text{Sign} \sum_{k=1}^K \alpha_k(m, n) B_{kB}(m, n), \quad |D_B(m, n)| = \max \{ |B_{kB}(m, n)|, k = \overline{1, K} \}.$$

В результате $D(m, n) = D_B(m, n) + D_H(m, n)$.

На рис. 6 приведен пример работы алгоритма комплексования разносектральных изображений ($K = 3$), дающий возможность визуально оценить достигаемый эффект.



Рис. 6. Слева – изображения трех спектральных каналов, справа – результат комплексирования

Алгоритм комплексирования оптических и тепловых изображений. На КА «Электро-Л» установлено многозональное сканирующее устройство, обеспечивающее съемку земной поверхности в трех каналах видимого диапазона спектра и в семи каналах инфракрасного (теплового) диапазона, каждый из которых несет уникальную информацию. Перед комплексированием изображения разных спектральных каналов высокоточно геометрически совмещаются в единой решетке пространственной дискретизации.

Пусть B - многозональный оптический снимок, $B = \{B_k, k = \overline{1, K}\}$, а F - тепловой. Изображение B разбивается на низкочастотные $B_H = \{B_{kH}, k = \overline{1, K}\}$ и высокочастотные $B_B = \{B_{kB}, k = \overline{1, K}\}$ составляющие. Низкочастотные составляющие результата комплексирования $D_H = \{D_{kH}, k = \overline{1, K}\}$ формируются по данным оптического снимка $D_{kH} = B_{kH}, k = \overline{1, K}$.

На основе теплового снимка F формируется многозональное изображение, в котором холодной температуре ставится в соответствие синий, а самой высокой температуре - красный цвет. В результате создается тепловой снимок $F = \{F_k, k = \overline{1, K}\}$. Формируются высокочастотные компоненты теплового снимка $F_B = \{F_{kB}, k = \overline{1, K}\}$. Комплексирование высокочастотных составляющих B_B и F_B для каждой точки выполняется как: $D_{kB} = \max \{B_{kB}, F_{kB}\}, k = \overline{1, K}$. В результате формируется итог комплексирования $D = \{D_k, k = \overline{1, K}\}$, где $D_k = D_{kB} + D_{kH}, k = \overline{1, K}$.

Этот алгоритм позволяет на оптическом снимке более ярко выделить границы холодных и горячих объектов.

Алгоритм комплексирования радиолокационных и оптических снимков.

Алгоритм основан на объединении высокочастотных составляющих радиолокационного изображения (РЛИ) и оптического снимка и их нанесении на низкочастотную компоненту оптического изображения. В результате комплексирования на оптической подложке отображаются наиболее яркие объекты РЛИ. К таким объектам относятся, например, военная техника, самолеты, корабли, столбы, заборы, дорожные ограждения и т.п.

Пусть $B(m, n)$ и $R(m, n)$ – оптический и радиолокационный снимки, сформированные в единой системе координат (m, n) . Представим $R(m, n)$ в виде суммы низко- и высокочастотных компонент: $R(m, n) = R_H(m, n) + R_B(m, n)$. $R_B(m, n)$ несет информацию о превышении радиолокационного эхо-сигнала от окружающего фона. Будем считать, что пиксель (m, n) РЛИ относится к важному для анализа объекту, если $R_B(m, n) \geq \kappa_a R_H(m, n)$, где κ_a – параметр алгоритма, подбираемый эмпирически на основе анализа материалов радиолокационной съемки Земли.

Процесс формирования результирующего изображения $D(m, n)$ на основе объединения $B(m, n)$ и $R(m, n)$ определен как

$$D(m, n) = \begin{cases} B(m, n), & R_B(m, n) < \kappa_a R_H(m, n), \\ B(m, n) + \frac{R_B(m, n)B_H(m, n)}{(1 + \kappa_a)R_H(m, n)}, & R_B(m, n) \geq \kappa_a R_H(m, n). \end{cases} \quad (14)$$

Результат комплексирования $D(m, n)$ по сути представляет собой оптическую подложку, на которую нанесены отнормированные к оптическому снимку элементы важных объектов радиолокационного изображения.

На рис. 7 приведен пример работы алгоритма комплексирования данных оптического и радиолокационного наблюдения. Видно, что столбы и дорожные ограждения перенесли на оптическое изображение, дополнив его новой ценной информацией.

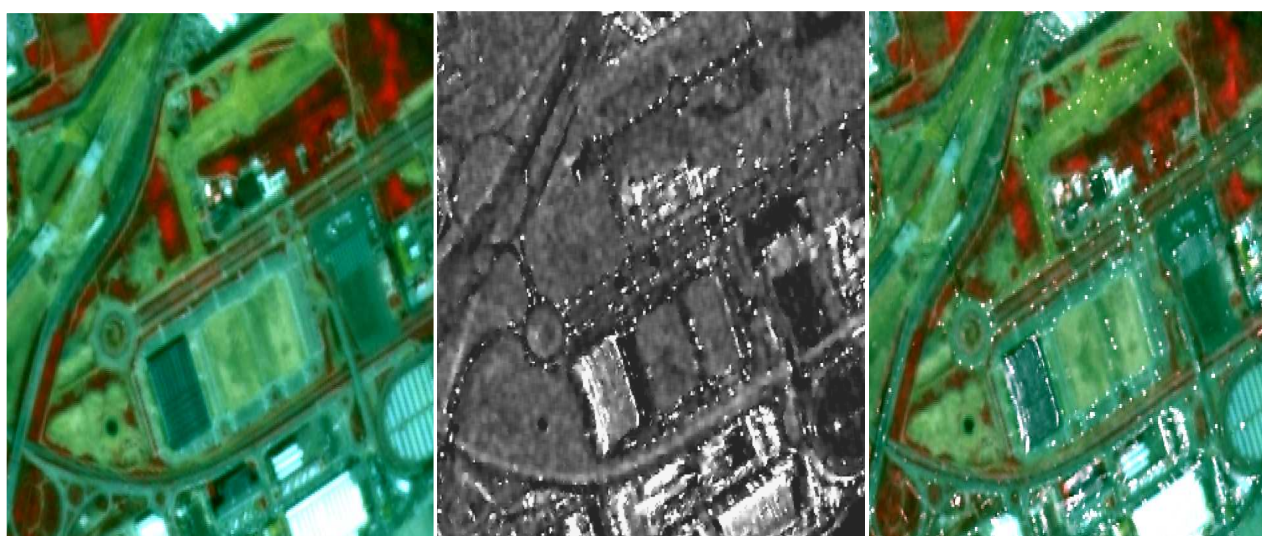


Рис. 7. Пример комплексирования(справа) оптического (слева) и радиолокационного (в центре) изображений

Выполнены экспериментальные исследования алгоритмов объединения оптической, тепловой и радиолокационной информации с целью численной оценки эффективности процесса комплексирования. На натурной информации от систем ДЗЗ различного назначения с использованием частотного и энтропийного критериев установлено, что информативность результата комплексирования по сравнению с исходным снимком повышается примерно на 30 %.

Разработан алгоритм повышения информативности материалов радиолокационной съемки за счет комплексирования РЛИ, полученных с различных точек наблюдения Земли. Он основан на аппарате нечеткой логики (*Положение 7, выносимое на защиту*) [17,21,23,25].

Радиолокационное зондирование Земли осуществляется в режиме бокового обзора. При такой съемке возникают специфичные искажения наблюдаемой сцены в виде разрывов фазовой картины, разрывов (растяжений) объектов, их переналожений друг на друга и затенений при съемке сильнопересеченной местности.

Первостепенной задачей для комплексирования РЛИ, полученных на различных витках, является устранение разрывов фазовой картины. Такие искажения возникают по двум основным причинам: сильный импульсный фазовый шум и крутые или отвесные склоны наблюдаемых объектов. Из-за наличия разрывов задача развертывания фазы имеет бесконечное множество возможных решений. Основным недостатком известных решений является большая вероятность возникновения систематической ошибки, распространяющейся на значительную часть интерферограммы. Для парирования этой проблемы предложен способ, защищенный патентом РФ [25]. Он предполагает выполнение следующих действий [15].

1. Выявляются короткие линии разрыва фазы на основе анализа локального наклона фазовой поверхности.

2. Выявляются длинные линии разрыва фазы на основе определения резких изменений локального наклона фазы и привлечения опорной низкодетальной информации о рельефе наблюдаемой сцены.

3. Уточняются положения длинных линий разрыва фазы на основе анализа локального наклона фазы и амплитуды сигнала на исходных радиолокационных изображениях, что позволяет уменьшить вероятность возникновения локальных ошибок развертывания фазы.

При съемке на восходящем и нисходящем витках орбиты космический аппарат оказывается с противоположных сторон от наблюдаемого объекта, на высокопересеченной местности на изображениях наблюдаются инверсия радиояркости, разное расположение разрывов, переналожений и областей радиотени. Ставится задача на основе РЛИ, полученных на восходящем и нисходящем витках, сформировать новое изображение, на котором в значительной мере скомпенсировано влияние теней, разрывов и переналожений.

Исходными данными для комплексирования выступают два ортотрансформированных РЛИ одной местности, снятые на восходящем и нисходящем витках орбиты КА. С использованием моделей координатного соответствия одноименных точек РЛИ и местности и цифровой модели рельефа (ЦМР) для ка-

ждого из РЛИ строятся маски разрывов, переналожений и затенений. Одно из РЛИ выбирается базовым, а другое - дополнительным. В результате комплексирования помещаются данные из обоих РЛИ в соответствии с масками и правилами нечеткой логики.

Пусть элементы ортотрансформированного РЛИ в картографической проекции имеют целочисленные координаты (x, y) . Эти координаты пересчитываются в геометрию исходного РЛИ «дальность – азимут» (R, η) . Затем координаты $(R + \Delta R, \eta, h(x, y))$, где $h(x, y)$ - высота точки, ΔR – шаг дискретизации по дальности, пересчитываются в новые (\hat{x}, \hat{y}) . Расстояние d_0 между (\hat{x}, \hat{y}) и (x, y) соответствует размеру пикселя РЛИ без растяжения и сжатия. Находятся две точки (x_1, y_1) и (x_2, y_2) путем отступления от точки (x, y) на разрешение ЦМР d_D в двух противоположных направлениях от вектора $(\hat{x} - x, \hat{y} - y)$. Координаты этих точек (x_1, y_1, h_1) и (x_2, y_2, h_2) переводятся в (R_1, η_1) и (R_2, η_2) . После этого степень растяжения пикселя определяется как

$$K_d(x, y) = (\max(d_0, d_{op}) |R_2 - R_1|) / 2 d_D, \quad (15)$$

где d_{op} – шаг пикселя ортотрансформированного изображения. Значения $K_d(x, y)$, существенно меньшие единицы, соответствуют разрывам, а отрицательные значения – переналожениям. Четкая маска разрывов и переналожений формируется путем интерполирования карты растяжения пикселей и пороговой обработки, а нечеткая маска $\mu(l)$ определяется как

$$\mu(l) = \begin{cases} 1, & l \leq 0, \\ 1 - 4l, & 0 < l < 0,25, \\ 0, & l \geq 0,25, \end{cases} \quad \text{где } l = K_d - 0,5. \quad (16)$$

Для получения маски затенений формируется карта возвышений объектов наблюдаемой сцены над границей тени, полученной путем трассировки лучей. Эта операция выполняется в геометрии исходного РЛИ, поскольку в этом случае луч направлен строго вдоль строки изображения. Для каждого пикселя (x, y) определяется направление трассировки луча в виде вектора $(\hat{x} - x, \hat{y} - y)$. В противоположном направлении ищется точка $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$, соответствующая предыдущей обработанной строке, для которой известна высота границы тени. Отрезок между точками $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ и (x, y) разбивается на несколько равных частей Q , длина которых d^* не превышает d_D , с помощью точек $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$, $i = \overline{1, Q-1}$. Для каждой i -й точки находится высота границы тени:

$$h^*(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i) = \max \{ h(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i), h^*(\tilde{x}_{i-1}, \tilde{y}_{i-1}) - d^* / \operatorname{tg} \alpha_n \}, \quad (17)$$

где α_n - угол отклонения направления зондирования от надира. Для точки (x, y) возвышение над границей тени определяется как

$$\Delta h^*(x, y) = h(x, y) - h^*(\tilde{x}_{Q-1}, \tilde{y}_{Q-1}) + d^* / \operatorname{tg} \alpha_n. \quad (18)$$

Отрицательные значения Δh^* соответствуют областям радиотени. Полученная карта значений $\Delta h^*(x, y)$ интерполируется в растр анализируемого РЛИ, а затем путем пороговой обработки из нее формируется нечеткая маска теней $\mu(s)$:

$$\mu(s) = \begin{cases} 1, & s \leq 0, \\ 1 - \frac{10}{3}s, & 0 < s < 0,3, \\ 0, & s \geq 0,3, \end{cases} \quad \text{где } s = \frac{\Delta h^* \operatorname{tg} \alpha_H}{d^*}. \quad (19)$$

На основе полученных масок разрывов, переналожений и теней строятся нечеткие правила комплексирования. Пусть l_1 и l_2 – булевы признаки наличия разрыва и переналожений на исходных РЛИ, а s_1 и s_2 – булевы признаки затенения. Тогда результат комплексирования S на основе основного S_1 и дополнительного S_2 РЛИ формируется как

$$S = (\overline{l_2} \wedge (s_1 \wedge \overline{s_2} \vee l_1)) S_1 + (\overline{l_2} \wedge (s_1 \wedge \overline{s_2} \vee l_1)) S_2, \quad (20)$$

где $(\wedge, \vee, -)$ – булевы операции: конъюнкция, дизъюнкция и инверсия.

При комплексировании РЛИ конъюнкции и дизъюнкции в (20) заменяются нечеткими аналогами на основе T -нормы $T(\mu(l), \mu(s)) = \mu(l \wedge s) = \mu(l)\mu(s)$ и T -конормы $F(\mu(l), \mu(s)) = \mu(l \vee s) = \mu(l) + \mu(s) - \mu(l)\mu(s)$.

На рис. 8 представлен пример комплексирования РЛИ.

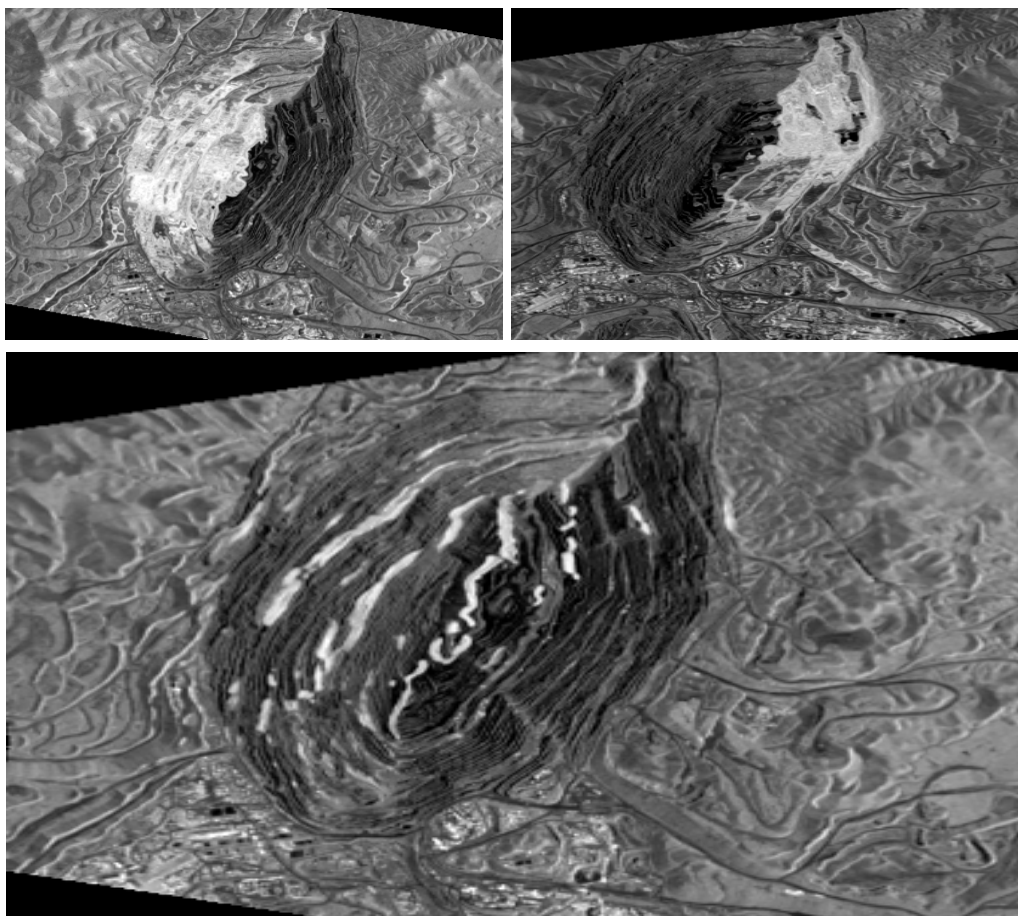


Рис. 8. Вверху – пара РЛИ с восходящего и нисходящего витков, внизу – результат комплексирования

Глава 5. Экспериментальное подтверждение эффективности методов и алгоритмов комплексирования данных от различных систем космического наблюдения Земли

В этой заключительной главе представлена доказательная база в виде результатов экспериментальной оценки эффективности предложенных решений по комплексированию разнородных данных от различных систем ДЗЗ. Акцент сделан на обоснование семи Положений, вынесенных на защиту в виде методов и алгоритмов комплексирования. Оценка их эффективности выполнялась с использованием критериев качества, рассмотренных в главе 2.

Для достоверной оценки эффективности предложенных методов и алгоритмов привлекалась статистически представительная выборка в виде десятков и сотен реальных космических снимков от систем ДЗЗ «Ресурс-О1», «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Аист-2Д», «Электро-Л». Натурные данные от этих систем использовались также для формирования модельных изображений для исследования вновь проектируемых российских систем ДЗЗ.

Метод комплексирования изображений от нескольких идентичных субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, основанный на алгебраическом подходе (глава 2, Положение 1, выносимое на защиту).

Для проверки алгебраического комплексирования на основе более 50 изображений от космических систем «Ресурс-О1», «Ресурс-П», «Аист-2Д» выполнялось моделирование эталонных видеоданных от идеального виртуального датчика и исходных снимков от отдельных субпиксельно смещенных ПЗС-линеек. Детальность и информативность смоделированных изображений и результатов их комплексирования оценивались по критериям, которые обоснованы в главе 2. Проведенные исследования показали, например, что в результате комплексирования данных от двух субпиксельно смещенных ПЗС-линеек детальность итогового изображения повысилась примерно в 1,6 раза, от трех линеек - в 1,9 раза, от четырех линеек - в 2,5 раза, от пяти линеек - в 2,8 раза.

Результаты, полученные по этим критериям, подтверждены с использованием альтернативной методики оценки линейного разрешения снимков, основанной на анализе резких переходов яркости границ объектов наблюдаемой сцены [5,7,8]. Эта методика аттестована ЦНИИ ВВКО МО РФ, в/ч 54023, в/ч 25951, НПП «ОПТЭКС», ОАО «ЛОМО» и прошла экспериментальную проверку для оценки качества материалов съемки от КА «Ресурс-П».

Метод комплексирования разносектральной видеоинформации от субпиксельно смещенных ПЗС-линеек в условиях геометрических искажений снимков в процессе их формирования (глава 2, Положение 2, выносимое на защиту).

Выполнены экспериментальные исследования этого метода с использованием более 30 изображений от КА «Ресурс-П», «Ресурс-О1», «Электро-Л». Каждый эксперимент строился по следующей схеме. Из исходного спектрального снимка выделялись изображения отдельных спектральных каналов, которые объединялись поэлементным суммированием с равными коэффициентами. Так формировался аналог высокодетальной панхроматической съемки, то

есть эталонное изображение. Затем с помощью операций расфокусировки, сдвига и прореживания генерировались снимки, выступающие в качестве моделей видеоданных от субпиксельно смещенных ПЗС-линеек. В результате их комплексирования синтезировалось изображение, степень улучшения качества которого определялась по пяти критериям, рассмотренным в главе 2. Эксперименты подтвердили эффективность этого метода, например в результате объединения данных от двух ПЗС-линеек достигается повышение разрешающей способности примерно в 1,4 раза.

Метод комплексирования геометрически совмещенных разносектральных снимков, основанный на стохастической модели космических изображений Земли (глава 3, Положение 3, выносимое на защиту).

Исследования метода проводились на представительной статистической выборке реальных данных от систем ДЗЗ «Ресурс-О1», «Ресурс-П», «Аист-2Д». Результат комплексирования сопоставлялся с изображениями каждого спектрального канала исходных видеоданных и с моделью панхроматической съемки. Для сопоставления применялись спектральный, разностный и энтропийный критерии. Установлено, что в результате стохастического комплексирования трех разносектральных снимков информативность итогового изображения повышается примерно на 27 %.

Алгоритмы комплексирования разносектральных изображений видимого диапазона, основанные на усилении их отличительных особенностей (глава 3, Положение 4, выносимое на защиту).

На 53 снимках от космических систем «Ресурс-П» и «Ресурс-О1» выполнена оценка эффективности двух алгоритмов комплексирования, рассмотренных в главе 3. Эксперименты подтвердили эффективность предложенных решений, например при объединении трех разносектральных изображений информативность итогового снимка повышается не менее чем на 25 % по спектральному и энтропийному критериям.

Метод объединения изображений с существенно различными пространственным и спектральным разрешениями (глава 3, Положение 5, выносимое на защиту).

Для подтверждения эффективности метода выполнено моделирование гиперспектрального изображения (ГСИ) низкого разрешения на основе высокодетальных данных от самолетного гиперспектрометра AVIRIS. Исходное ГСИ было прорежено в 14 раз для получения модели изображения низкого пространственного разрешения. Для формирования многозонального снимка высокого пространственного разрешения спектральные каналы исходного ГСИ усреднялись и формировались данные для 4-х разносектральных изображений. После этого выполнялась обработка прореженного ГСИ и высокодетального изображения предложенным методом и результат сравнивался с использованием меры спектрального угла с эталонным высокодетальным гиперспектральным снимком [11,14].

Исследования показали, что скомплексированное ГСИ обладает более высокими геометрическими и спектральными характеристиками по отношению к известным технологиям Pansharpening.

Алгоритмы комплексирования оптических снимков с данными радиолокационного и теплового наблюдения Земли на основе независимой обработки высоко- и низкочастотных компонент изображений (глава 4, Положение 6, выносимое на защиту).

Выполнена оценка эффективности алгоритма комплексирования оптических и тепловых изображений. Обработка осуществлялась с использованием 67 материалов съемки от КА «Электро-Л», на борту которого установлена аппаратура, выполняющая сканирование земного диска в трех видимых и семи инфракрасных диапазонах спектра. Для комплексирования использовались изображения в виде стандартных информационных продуктов уровня 1.5 [4], что обеспечило их высокоточное геометрическое совмещение. Исследования показали, что в результате комплексирования повысилась четкость оптических снимков за счет добавления информации из тепловых диапазонов. Информативность скомплексированных данных увеличилась более чем на 32 % (по частотному и энтропийному критериям).

Выполнена оценка эффективности алгоритма комплексирования гиперспектральной и радиолокационной видеоинформации. Она проводилась с использованием более 20 наборов снимков от гиперспектральной аппаратуры «Hyperion» КА «ЕО-1» и радиолокационного спутника КА «RadarSat-2», подобного создаваемому российскому КА «Обзор-Р». После комплексирования на каналах гиперспектрального изображения дополнительно отобразились металлические объекты, обнаруженные при радиолокационной съемке. Оценка эффективности алгоритма осуществлялась с использованием частотного и энтропийного критериев. Исследования показали, что в результате комплексирования гиперспектральных и радиолокационных снимков информативность итогового изображения повышается примерно на 30 %.

Алгоритм повышения четкости отображения объектов на радиолокационном изображении путем комплексирования материалов съемки с различных точек наблюдения Земли (глава 4, Положение 7, выносимое на защиту).

Комплексирование радиолокационных данных, полученных в режиме бокового обзора на различных витках, выполнялось по данным от КА «TerraSAR-X» (аналог КА «Обзор-Р»). Обработано более 20 пар радиолокационных изображений. Оценка качества комплексирования выполнялась по критерию энтропии. Эксперименты показали, что результат комплексирования радиолокационных данных, полученных с различных точек наблюдения Земли, сильно зависит от вида рельефа. На плоских участках информативность объединенного изображения практически не изменяется, поскольку доля участков с радиотенью незначительна. В случае съемки земной поверхности с сильно изменяющейся высотой объектов наблюдаемой сцены достигается значительный эффект повышения информативности на скомплексированном снимке примерно на 22 % и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен системный анализ проблемы комплексирования разнородных данных от различных систем дистанционного зондирования Земли. Показано, что известные алгоритмы и методы не позволяют в полном объеме решить эту задачу. Определены концептуальные направления по созданию новых технологий комплексирования разноспектральных изображений, учитывающие особенности космических систем оптической, тепловой и радиолокационной съемки Земли.

2. Разработан метод алгебраического комплексирования видеоданных от нескольких идентичных ПЗС-линеек, установленных с субпиксельным смещением полей обзора одноименных фотоприемников. На модельной и натурной информации получены численные оценки повышения пространственного разрешения материалов съемки за счет их комплексирования: при использовании двух ПЗС-линеек - в 1,6 раза, трех линеек - в 1,9 раза, четырех линеек - в 2,5 раза.

3. Предложен и исследован метод комплексирования видеоданных от нескольких субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, работающих в различных спектральных диапазонах и в условиях геометрических искажений наблюдаемой сцены. Основу метода составляют математически описанные процессы: яркостной интерполяции отсчетов исходных изображений в нерегулярной решетке пространственной дискретизации; идентификации и коррекции инверсных областей на разноспектральных изображениях. Экспериментальные исследования показали, что, например, при комплексировании данных от 2-х разнотональных ПЗС-линеек пространственное разрешение повышается примерно в 1,4 раза.

4. Разработан и исследован метод комплексирования разноспектральных космических изображений, основанный на стохастической модели изображений. Численные оценки эффективности такого подхода показали повышение информативности результирующего изображения, например, при объединении трех снимков на 27 % и более.

5. Предложен и исследован метод комплексирования разноспектральных изображений, основанный на анализе их отличительных особенностей, обеспечивающий повышение четкости отображения объектов наблюдаемой сцены более чем на 25 % при объединении трех изображений по отношению к наиболее информативному исходному снимку.

6. Разработан метод комплексирования изображений с существенно различными пространственно-спектральными характеристиками, эффективность которого экспериментально подтверждена на натурной информации. Предложенное решение защищено патентом РФ.

7. Разработан алгоритм комплексирования оптических снимков с данными радиолокационного и теплового наблюдения Земли на основе независимой обработки высоко- и низкочастотных компонент изображений. Экспериментально подтверждено повышение информативности объединенного снимка примерно на 30 % по частотному и энтропийному критериям.

8. Предложен алгоритм повышения четкости отображения объектов на радиолокационном изображении путем комплексирования материалов съемки с различных точек наблюдения Земли, основанный на использовании математического аппарата нечеткой логики. Экспериментально подтверждена его эффективность.

9. Разработанные методы и алгоритмы комплексирования информации от различных систем ДЗЗ реализованы в виде отдельных модулей в составе специального программного обеспечения комплексирования, которое получило внедрение в центрах приема и обработки спутниковой информации от существующих и вновь проектируемых отечественных систем ДЗЗ: «Ресурс-П», «Аист-2Д», «Обзор-Р», «Ресурс-О1», «Электро-Л», «Арктика-М» и др.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Всего по теме диссертации опубликовано 108 работ. Ниже приводятся работы, в которых наиболее полно раскрываются Положения (методы и алгоритмы), выносимые на защиту.

Статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Москвитин А.Э. Технологии повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектральной видеoinформации // Вестник РГРТУ. 2004. № 14. С. 22 - 28.

2. Еремеев В.В., Злобин В.К., Москвитин А.Э. Повышение информативности материалов космической съемки путем комплексирования спектральной видеoinформации // Известия ТулГУ. Т. 1. Вып. 4. Тула: ТулГУ, 2005. С. 15 - 23.

3. Еремеев В.В., Злобин В.К., Москвитин А.Э. Методы и технологии комплексирования спектральной видеoinформации // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 1. С. 30 - 36.

4. Егوشкин 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.

5. Еремеев В.В., Князьков П.А., Москвитин А.Э. Оценка разрешающей способности аэрокосмических изображений на основе их статистического анализа // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 3. С. 21 - 26.

6. Егوشкин 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.

7. Еремеев В.В., Князьков П.А., Москвитин А.Э. Оценка уровня аддитивного шума на аэрокосмических изображениях поверхности Земли // Вестник РГРТУ. 2010. № 32. С. 8 - 11.

8. Еремеев В.В., Князьков П.А., Козлов Е.П., Москвитин А.Э. Технологии анализа и оценки качества космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 37 - 43.

9. Антонушкина С.В., Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Особенности анализа и обработки информации от систем гиперспектральной съемки земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 4. С. 42 - 46.

10. 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.

11. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Повышение четкости отображения объектов на изображениях земной поверхности на основе данных гиперспектральной съемки // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 35 - 39.

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

13. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Мятлов Г.Н. Повышение информативности материалов съемки Земли за счет объединения гиперспектральной информации с данными от других съемочных систем // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 4. С. 37 - 41.

14. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Повышение пространственного разрешения материалов гиперспектральной съемки Земли на основе их комплексирования с высокодетальными снимками // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 3. С. 38 - 42.

15. 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.

16. 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.

17. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексование радиолокационных изображений от восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 10 - 15.

18. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексование радиолокационных и оптических изображений от космических систем дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2019. № 5. С. 183 - 191.

19. Москвитин А.Э. Комплексование видеoinформации от различных систем космического наблюдения Земли // Вестник РГРТУ. 2020. № 71. С. 108 - 116.

20. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Комплексование субпиксельно смещенных изображений с целью повышения разрешающей способ-

ности систем космического наблюдения Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли. М.: ИКИ РАН. 2020. № 2. С. 75 - 82.

21. Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Современные проблемы комплексирования изображений от различных систем дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 11 (21). С. 89 - 100.

Коллективные монографии

22. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с. (Москвитин А.Э. - в части главы 6, С. 367-394).

23. 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. (Москвитин А.Э. - в части параграфа 3.6, С. 138-150).

Патенты

24. Способ повышения детальности материалов гиперспектральной съемки Земли на основе привлечения многозональных изображений высокого пространственного разрешения: пат. 2579046 РФ / В.В. Еремеев, А.А. Макаренков, А.Э. Москвитин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». Заявка № 2014119598; заявл. 15.05.2014; опубл. 02.03.2016.

25. 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». Заявка № 2016113159; заявл. 07.04.2016; опубл. 07.03.2017.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

26. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П., Москвитин А.Э. Программа высокоточной геодезической привязки изображений геостационарных и высокоэллиптических спутников по контурным точкам диска Земли и электронным картам // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661590, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 30.10.2015.

27. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Программа высокоскоростного обмена большими объемами данных через общую разделяемую память // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661680, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.10.2015.

28. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Программа геометрической нормализации изображений высокоэллиптического спутника // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661589, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 14.09.2015.

29. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Программа организации и распараллеливания процесса геометрических преобразований многозональных изображений // Свидетельство о государственной регистрации программы

для ЭВМ № 2015661681, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.10.2015.

30. Князьков П.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Программа анализа и оценки качества получаемой информации // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662475, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.11.2016.

31. Князьков П.А., Москвитин А.Э. Программа управления файловой базой данных оценок параметров качества изображений // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615262, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.06.2013.

Тезисы докладов на международных конференциях

32. Москвитин А.Э. Технология фотометрического совмещения спектрональных космических изображений // Тез. докл. междунар. конф. «XXVI Гагаринские чтения». М., 1999. С. 402 - 403.

33. Москвитин А.Э. Концептуальные направления к решению задачи комплексирования изображений земной поверхности // Тез. докл. междунар. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2002. С.145 - 146.

34. Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Стохастическая модель спектрональных изображений в задаче их комплексирования // Тез. докл. междунар. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2002. С.77-78.

35. Москвитин А.Э. Программное обеспечение комплексирования спутниковых изображений // Тез. докл. междунар. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань: РГРТУ, 2003. С. 323 - 325.

36. Москвитин А.Э. Комплексирование видеоданных от геостационарных космических систем наблюдения Земли // Материалы III междунар. науч.-техн. форума «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2020). Рязань: РГРТУ, 2020. С. 186 - 189.

Москвитин Алексей Эдуардович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.