

Аб *На правах рукописи*

МАКАРЕНКОВ Александр Алексеевич

**АЛГОРИТМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2015

Работа выполнена в Рязанском государственном
радиотехническом университете (РГРТУ)

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

Официальные оппоненты: **Кузнецов Павел Константинович**
доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Электропривод и промышленная автоматика»
Самарского государственного технического
университета

Мойбенко Виктор Иванович
кандидат технических наук, ведущий инженер
ЗАО «Рязанская радиоэлектронная компания»

Ведущая организация: **Институт космических исследований РАН,**
г. Москва

Защита состоится **16 декабря 2015 года в 10 ч** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

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

Автореферат разослан

2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
канд. техн. наук, доцент



Пржегорлинский В.Н

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. В последние годы в нашей стране и за рубежом в практику дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно внедряются технологии гиперспектральной съемки. Это новое перспективное направление исследования объектов земной поверхности – изучение их свойств на основе анализа информации о распределении отраженного от них излучения в зависимости от длины волны. Для этого создается гиперспектральная аппаратура (ГСА) авиационного и космического базирования. Такая аппаратура позволяет получить для заданного района местности сотни изображений, зафиксированных в очень узких соприкасающихся спектральных диапазонах. В результате съемки формируется так называемый гиперкуб данных в виде набора изображений одной и той же сцены, но полученных в различных спектральных диапазонах. Каждой точке гиперкуба соответствует спектральная характеристика (СХ) в виде вектора отсчетов яркости в зависимости от длины волны регистрируемого излучения. СХ несет информацию о физико-химических свойствах наблюдаемого объекта. На этой основе гиперспектральное наблюдение Земли позволяет эффективно решать важные задачи в области экологии, лесного и сельского хозяйств, изучения атмосферы, гидрометеорологии, анализа техногенных явлений, военной разведки и др.

За рубежом работы по созданию систем гиперспектральной съемки ведутся с середины 1980-х гг. За это время создан ряд аэрокосмических систем гиперспектрального наблюдения Земли, таких как CHRIS (Sira Technology Ltd, Великобритания; Verhaert Design and Development, Бельгия, 2001 г.); NICO (The Aerospace Corporation, Johnson Space Center, США, 2009 г.); Hyperion (TRW Inc., США, 2000 г.); HIS EnMap (Kayser-Threde GmbH, German Research Centre for Geosciences, Германия, система планируется к использованию в 2018 г.) С самого начала экспериментальной и штатной эксплуатации подобных систем решен ряд важных задач в гражданской и военной сферах.

В России работы в данном направлении были начаты параллельно с зарубежными. Первые образцы самолетной гиперспектральной аппаратуры созданы в конце 1980-х годов в Ленинградском институте точной механики и оптики. Однако первые образцы ГСА космического базирования появились совсем недавно: на малом космическом аппарате МКА-ФКИ «Зонд-ПП» (головной разработчик – НПО им. С.А. Лавочкина, 2012 г.); на космическом аппарате (КА) «Ресурс-П» №1 (головной разработчик – Самарский Ракетно-космический центр «Прогресс», разработчик ГСА – Красногорский завод им. С.А.Зверева, 2013 г). Таким образом, в нашей стране работы по созданию ГСА идут с некоторым отставанием от США, Великобритании, Германии и других зарубежных стран. Для достижения паритета в этой области Федеральной космической программой на 2006 – 2015 гг., а также ее проектом на 2016 – 2025 гг., предусмотрена разработка гиперспектральных съемочных систем.

Работы по созданию авиационных и космических систем гиперспектрального наблюдения Земли активно ведут Ракетно-космический центр «Про-

гресс», НПО им. С.А. Лавочкина, Красногорский завод им. С.А. Зверева, ЦНИИмаш, НПО «Лептон», Корпорация «ВНИИЭМ», Центр Келдыша, НПП «ЭЛАР», Институт космических исследований РАН, НТЦ «Реагент» и другие предприятия ракетно-космической промышленности.

В проектировании наземных средств обработки гиперспектральной информации активно участвуют ВКА им. А.Ф.Можайского, Госцентр «Природа», МГТУ им. Н.Э.Баумана, МФТИ, НИЦ «Планета», РГРТУ, ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт систем обработки изображений РАН, Институт космических исследований РАН, Научный центр оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы» и другие научные центры.

Прежде чем использовать гиперспектральную информацию по назначению, необходимо выполнить ее предварительную обработку: восстановить измерительные свойства и повысить качество. Основными задачами предварительной обработки являются устранение различного рода искажений, которые появляются в процессе формирования гиперспектральных изображений (ГСИ), и получение стандартных информационных продуктов, принятых в международной практике. Важной задачей предварительной обработки также является объединение данных от нескольких оптико-электронных приборов (ОЭП), входящих в ГСА и работающих в различных спектральных диапазонах.

Гиперспектральные снимки предоставляют новые возможности по получению изображений с улучшенными характеристиками путем комплексирования информации из отдельных спектральных каналов или объединения ГСИ с видеоданными от других съемочных систем.

Настоящая диссертационная работа нацелена на решение этих вопросов.

Целью диссертации является создание алгоритмов предварительной обработки материалов гиперспектральной съемки Земли для восстановления их измерительных свойств и повышения качества отображения объектов наблюдаемой сцены.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи:**

- проводится анализ комплексной технологии обработки гиперспектральных данных и преобразования в формат, принятый в международной практике;
- разрабатываются алгоритмы объединения гиперспектральной информации от различных оптико-электронных приборов, входящих в ГСА, в единый гиперкуб на основе пространственной и частотной фильтрации;
- создаются алгоритмы комплексирования данных от различных спектральных каналов ГСА и совмещения ГСИ с видеоданными от других съемочных систем с целью повышения четкости отображения земной поверхности;
- разрабатываются алгоритмы выделения на ГСИ границ объектов на основе анализа их пространственно-спектральных характеристик;

- осуществляется практическая реализация разработанных алгоритмов и оценка эффективности их работы на натурной информации от авиационных и космических систем гиперспектральной съемки Земли.

Научная новизна диссертации определяется тем, что в ней представлены новые эффективные алгоритмы предварительной обработки гиперспектральных изображений с целью улучшения их измерительных свойств и повышения качества отображения объектов земной поверхности.

Основные новые научные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм объединения гиперспектральной информации от различных оптико-электронных приборов в единый гиперкуб на основе линейной фильтрации исходных данных с оценкой параметров фильтра в пространственной и частотной областях;
- алгоритмы комплексирования данных от нескольких спектральных каналов гиперспектральной аппаратуры с целью повышения четкости отображения земной поверхности;
- алгоритм выделения на гиперспектральных изображениях границ объектов наблюдаемой сцены на основе анализа их пространственно-спектральных характеристик;
- алгоритм повышения детальности материалов гиперспектральной съемки Земли на основе привлечения многозональных изображений высокого пространственного разрешения.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что в ней предложены и исследованы новые алгоритмы предварительной обработки гиперспектральных изображений от различных космических систем наблюдения Земли и на основе этих алгоритмов созданы программные комплексы, получившие эффективное внедрение на практике.

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

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках ОКР 14-11, НИР 9-14Г, ОКР 33-14. Результаты работы в виде алгоритмов и программного обеспечения внедрены в Научном центре оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы» (г. Москва) и Ракетно-космическом центре «Прогресс» (г. Самара), что подтверждается актами.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 3-х международных и 11-и всероссийских научно-технических конференциях: на международной конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2010, 2012), международной конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформа-

тика» (Рязань, 2013); всероссийских конференциях «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2012, 2013), «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2012, 2013, 2014), «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2011, 2015), «Гиперспектральные приборы и технологии» (Красногорск, 2013), «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2010, 2011, 2012, 2014).

Достоверность результатов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, экспериментальными исследованиями и практическим внедрением.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 33 работы: 8 статей (5 по списку ВАК), монография (в части главы 6), 24 тезиса докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения, которое содержит документы о внедрении результатов. Основной текст работы составляет 122 с., 37 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 122 наименования на 16 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 выполнен анализ алгоритмов и информационных технологий получения и обработки данных от систем гиперспектрального наблюдения Земли. Определены основные направления исследований по созданию новых эффективных средств предварительной обработки ГСИ.

По результатам выполненного анализа сделаны два вывода.

Во-первых, ряд задач по предварительной обработке ГСИ, таких как геодезическое ориентирование, трансформирование в картографические проекции, формирование «мозаик», может быть решен на основе развития и обобщения результатов, полученных ранее применительно к обработке многозональных данных. Поэтому эти вопросы в настоящей работе не рассматриваются.

Во-вторых, гиперспектральная информация – это довольно специфичный новый вид данных ДЗЗ, поскольку помимо пространственных измерений они содержат спектральную компоненту в виде зависимости излучения от длины волны. Этот факт предоставляет дополнительные возможности по получению сведений об объектах Земли и требует проектирования новых алгоритмов обработки видеоданных. Последнее замечание обуславливает необходимость проведения научных исследований в области создания средств предварительной обработки ГСИ по следующим основным направлениям.

Первое направление включает разработку алгоритмов восстановления измерительных свойств гиперспектральных изображений. Цель этого направления работ состоит в том, чтобы устранить на ГСИ искажения, возникающие в процессе их формирования, и получить на базе гиперспектральных данных стандартные информационные продукты, принятые в международной практике.

Эти продукты позволяют с заданной точностью определять координаты объектов и приписывать им значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), зафиксированные во вполне определенных спектральных диапазонах.

Второе направление исследований связано с разработкой алгоритмов повышения качества материалов гиперспектральной съемки Земли на основе комплексирования данных от различных каналов ГСА, а также объединения ГСИ с видеоданными от других съемочных систем. Поскольку объекты в спектральных каналах ГСИ отображаются с различным контрастом, то появляется уникальная возможность объединения информации с целью получения новых изображений, на которых все объекты наблюдаемой сцены отображаются с повышенной четкостью. Комплексирование ГСИ с данными от других съемочных систем позволяет путем объединения свойств совмещаемых данных повысить информативность гиперспектральных снимков.

Третье направление работ связано с практической реализацией алгоритмов восстановления измерительных свойств ГСИ и комплексирования гиперспектральной информации, а также оценкой эффективности этих алгоритмов с использованием специализированных мер качества.

Решение задач по этим 3-м направлениям составляет основное содержание диссертационной работы.

В главе 2 разработаны алгоритмы восстановления измерительных свойств гиперспектральных изображений: алгоритмы формирования единого гиперкуба данных от нескольких ОЭП гиперспектрометра; статистической коррекции атмосферных искажений и выделения границ объектов на ГСИ.

Гиперспектрометр обычно строится из нескольких ОЭП. Из-за отличий их оптических трактов данные имеют различные пространственные разрешения. Стоит задача выравнивания этой характеристики.

Представлено решение этой задачи. Рассмотрим геометрически совмещенные изображения $A(x, y)$ и $B(x, y)$ от двух ОЭП. Модель этих изображений может быть определена как

$$A(x, y) = S(x, y) \otimes H_A + N_A(x, y), \quad B(x, y) = S(x, y) \otimes H_B + N_B(x, y), \quad (1)$$

где $S(x, y)$ – истинное изображение подстилающей поверхности; H_A, H_B – функции рассеяния точки; $N_A(x, y), N_B(x, y)$ – независимый случайный шум с нулевым средним; \otimes – операция свертки.

Необходимо скорректировать A и B так, чтобы после обработки пространственные разрешения изображений максимально приблизились друг к другу. Эта задача решается путем нахождения линейного фильтра F , такого что $\forall S$ имеет место равенство:

$$S(x, y) \otimes H_A \otimes F = S(x, y) \otimes H_B. \quad (2)$$

Предложена процедура поиска F , не требующая знания H_A, H_B и $S(x, y)$.

Первый подход основан на определении F в пространственной области. Оценка этого фильтра в виде функции $F^*(x, y)$ с ограниченным носителем $x = -\overline{N/2, N/2}$, $y = -\overline{N/2, N/2}$ (N – четно) выполняется исходя из критерия

$$\sum_{(x,y)} \left(A(x, y) \otimes F^*(x, y) - B(x, y) \right)^2 = \min. \quad (3)$$

Решение (3) относительно параметров «оконного» фильтра F^* находится по методу наименьших квадратов. Для адекватной оценки F^* при наличии шумов необходимо, чтобы $mn \gg NN$.

Второй подход основан на поиске фильтра F путем оценки его параметров в спектральной области. С учетом (1) условие (2) представлено как

$$A(x, y) \otimes F - B(x, y) = N_A(x, y) \otimes F - N_B(x, y). \quad (4)$$

Выражение (4) в спектральной области принимает вид

$$\hat{A}(\omega, \xi) \hat{F}(\omega, \xi) - \hat{B}(\omega, \xi) = \hat{N}_A(\omega, \xi) \hat{F}(\omega, \xi) - \hat{N}_B(\omega, \xi), \quad (5)$$

где $\hat{A}(\omega, \xi)$, $\hat{F}(\omega, \xi)$, $\hat{B}(\omega, \xi)$, $\hat{N}_A(\omega, \xi)$, $\hat{N}_B(\omega, \xi)$ – спектры Фурье соответствующих изображений и сигналов. Для оценки фильтра $\hat{F}(\omega, \xi)$ используется несколько реализаций изображений A_i , B_i , соответствующих различным сюжетам S_i , в этом случае оценка фильтра находится исходя из критерия

$$\sum_i \left| \hat{A}_i(\omega, \xi) \hat{F}^*(\omega, \xi) - \hat{B}_i(\omega, \xi) \right|^2 = \min. \quad (6)$$

С использованием МНК находится решение (6)

$$\hat{F}^*(\omega, \xi) = \left[\sum_i \hat{B}_i(\omega, \xi) \overline{\hat{A}_i(\omega, \xi)} \right] / \sum_i \left| \hat{A}_i(\omega, \xi) \right|^2, \quad (7)$$

где $\overline{\hat{A}_i(\omega, \xi)}$ – комплексно-сопряженное для числа $\hat{A}_i(\omega, \xi)$.

В результате экспериментальных исследований рассмотренных подходов с использованием ГСИ от КА «Ресурс-П» установлено:

- предложенные алгоритмы позволяют сократить различия разрешений изображений от ОЭП 1 и ОЭП 2 не менее чем в 3 раза;
- пространственный подход менее критичен к характеристикам ГСИ, но может быть использован только при малых размерах носителя фильтра F ;
- частотный подход не накладывает ограничений на размеры фильтра, но предъявляет более жесткие требования к характеристикам анализируемых ГСИ;
- форма функций рассеяния точки ОЭП 1 и ОЭП 2 позволяет решать задачу инверсной фильтрации без значительных искажений.

Рассмотрены вопросы статистической коррекции атмосферных искажений ГСИ. В отличие от многофакторных аналитических моделей, такой подход не требует знания большого числа параметров состояния атмосферы и условий съемки. Он основан на том факте, что для ограниченного по размерам

прямоугольного фрагмента искажающее действие атмосферы неизменно. Для произвольного i -го фрагмента с центром (m_i, n_i) и числом пикселей N_ϕ , которые определяют область Ω_i , можно считать, что мультипликативный α_{ki} и аддитивный β_{ki} коэффициенты, описывающие искажения атмосферы, постоянны.

Согласно этому подходу скорректированное изображение B_{ki}^* находится как

$$B_{ki}^*(m, n) = [B_{ki}(m, n) - B_{ki}] / \sqrt{D_{ki}}, \quad (m, n) \in \Omega_i, \quad k = \overline{1, K}, \quad (8)$$

где $B_{ki}(m, n)$, B_{ki} , D_{ki} – соответственно i -й фрагмент k -го канала гиперкуба, среднее значение его яркости и дисперсия.

Скорректированное по (8) изображение B_{ki}^* формируется в некоторой новой шкале величин (отличной от СПЭЯ). В то же время оно может быть эффективно использовано для решения ряда важных задач, не требующих представления ГСИ в единицах СПЭЯ, например выделение границ и сегментация объектов земной поверхности. В ходе экспериментальных исследований с привлечением натуральных ГСИ показана корректность статистической обработки. В частности, при статистической коррекции полностью устраняются резкие искажения спектральных характеристик в «полосах» поглощения атмосферы.

Разработан алгоритм выделения на ГСИ границ объектов на основе анализа их пространственно-спектральных характеристик. На ГСИ каждому пикселю ставится в соответствие спектральная характеристика. Эта уникальная возможность позволяет более качественно решить задачу определения меры близости элементов изображения и на этой основе эффективно решить задачу выделения границ объектов.

В работе выполнен анализ 3-х частотно-пространственных мер сходства СХ соседних по строке точек B_{mn} и $B_{m+1,n}$ – корреляционной, среднеквадратической и спектрально-угловой:

$$\rho_{mn} = \left[\overline{B_{mn} \cdot B_{m+1,n}} - \overline{B_{mn}} \cdot \overline{B_{m+1,n}} \right] / \left[\sigma_{mn} \sigma_{m+1,n} \right],$$

$$\Delta_{mn} = \sqrt{\left(\overline{B_{mn}} - \overline{B_{m+1,n}} \right)^2}, \quad \alpha_{mn} = \arccos \left(\overline{B_{mn} \cdot B_{m+1,n}} / \sqrt{\overline{B_{mn}^2} \overline{B_{m+1,n}^2}} \right),$$

где σ_{mn} и $\sigma_{m+1,n}$ – среднеквадратические отклонения отсчетов спектральных характеристик, а черта над переменными и выражениями означает операцию усреднения по K спектральным диапазонам.

Если в известных операторах контурной обработки сравниваются яркости соседних точек изображения, то для ГСИ предлагается применять традиционные операторы, но с использованием мер Δ_{mn} , ρ_{mn} , α_{mn} . Например, для меры сходства ρ_{mn} известные операторы имеют следующие представления.

- Оператор градиента: $G_{m,n} = \sqrt{\rho_{m+1,n}^2 + \rho_{m,n+1}^2}$.
- Оператор Лапласа: $L_{m,n} = 0,25 (\rho_{m-1,n} + \rho_{m+1,n} + \rho_{m,n-1} + \rho_{m,n+1})$.
- Оператор Собела: $S_{m,n} = \sqrt{\rho_{mn}^2(X_1, X_2) + \rho_{mn}^2(Y_1, Y_2)}$,

$$\text{где } X_1 = B_{m+1,n-1} + 2B_{m+1,n} + B_{m+1,n+1}, \quad X_2 = B_{m-1,n-1} + 2B_{m-1,n} + B_{m-1,n+1},$$

$$Y_1 = B_{m-1,n-1} + 2B_{m,n-1} + B_{m+1,n-1}, \quad Y_2 = B_{m-1,n+1} + 2B_{m,n+1} + B_{m+1,n+1}.$$

На рисунке 1 представлены результаты выделения границ на ГСИ с использованием оператора градиента, основанного на анализе яркостей (рисунок 1, слева) и коэффициента корреляции СХ (рисунок 1, справа). Как видим, сопоставление СХ дает качественно лучший результат.

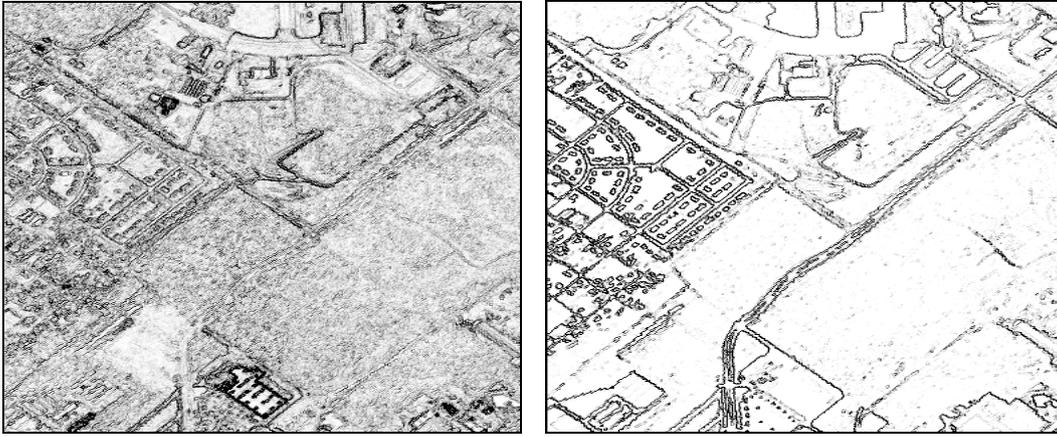


Рисунок 1 – Результат выделения границ на гиперспектральном изображении

В главе 3 предложены алгоритмы комплексирования данных из различных спектральных диапазонов ГСИ и объединения гиперспектральных данных с высокодетальными многозональными изображениями.

Объекты земной поверхности на ГСИ в одних каналах отображаются более светлыми, а в других – более темными по отношению к окружению. Предложен ряд алгоритмов формирования нового изображения, на котором с высокой четкостью отображаются все объекты наблюдаемой сцены.

- *На основе меры отличия СХ от среднего уровня.* В данном случае используется мера $\gamma_1 = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B_k - \bar{B})^2}$ либо мера $\gamma_2 = \arccos \alpha = \bar{B} / \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_k^2}$, а результат формируется соответственно как $B^* = \bar{B} + \gamma_1$, $B^* = \bar{B} \cdot \gamma_2$.

- *На основе характера изменения СХ.* Используется мера $\gamma_3 = \left(\frac{\sum_{k=1}^K (K+1-k)B_k}{\sum_{k=1}^K kB_k} \right)$, в результате $B^* = \bar{B} \cdot \gamma_3$.

- *На основе представления СХ в виде степенного полинома 3-го порядка.* Используется мера $\gamma_4 = (\text{sign} S_1) \cdot \prod_{i=1}^{P+1} \sqrt{S_i/n_i}$, $P \in \{1, 2, 3\}$ – число пересечений полинома и среднего уровня яркости, S_i и n_i – площадь и число спектральных каналов для интервала между i -й и $(i+1)$ -й точками пересечения полинома и среднего уровня яркости. В данном случае $B^* = \gamma_4$.

- *На основе выделения границ объектов.* Результат комплексирования формируется как $B^* = \bar{B}(1 + \gamma_5)$, где $\gamma_5 = 1 - \tilde{\rho}$, $\tilde{\rho}$ – изображение границ.

На рисунке 2 приведены результаты комплексирования каналов ГСИ. Используются данные от авиационного гиперспектрометра AVIRIS (предоставленные NASA/JPL-Caltech). Численные оценки качества представлены в главе 4.

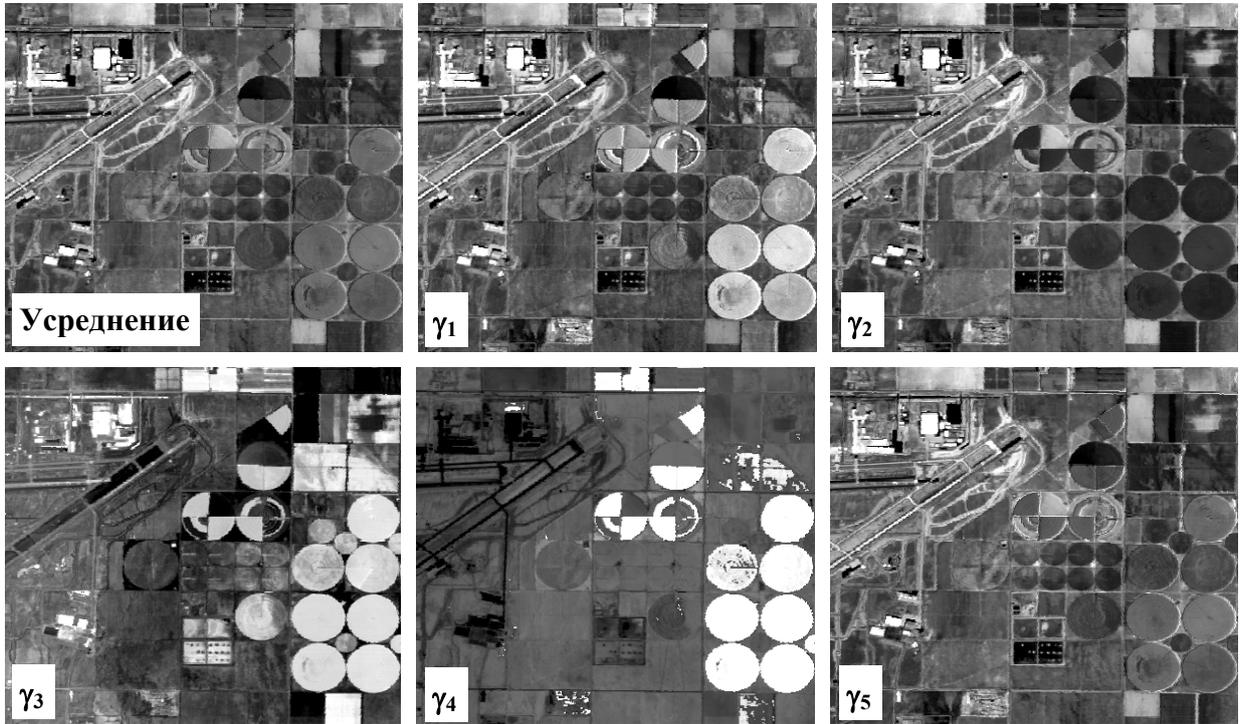


Рисунок 2 – Результаты комплексирования каналов ГСИ

Рассмотрена задача комплексирования ГСИ B и высокодетального многозонального снимка D , обладающего многократно большим пространственным разрешением. Цель решения этой задачи состоит в получении нового гиперспектрального изображения D^* , обладающего спектральным разрешением, близким к B , и пространственным разрешением, близким к D . Алгоритм решения этой задачи включает следующие этапы.

Этап 1. Гиперспектральное изображение B приводится к спектральному разрешению снимка D . Эта процедура выполняется путем интегрирования значений спектральной характеристики каждой точки B в диапазонах длин волн, соответствующих D . В результате формируется новое многозональное изображение \tilde{B} , определенное в той же редкой решетке, что и B , и с тем же числом спектральных компонент, что и D .

Этап 2. Для каждого пикселя изображения \tilde{B} в пределах его апертуры анализируются пиксели изображения D , попавшие в эту апертуру. Если по спектральным компонентам все пиксели изображения D схожи с пикселем изображения \tilde{B} , то последний считается "чистым" (т.е. включающим один вполне определенный объект), а соответствующая ему СХ на снимке B заносится в список опорных спектральных характеристик S .

Этап 3. В списке S удаляются все дублирующиеся СХ.

Этап 4. Каждому пикселю изображения D присваивается та СХ из списка S , которая наиболее близка к его спектральному компоненту. В результате в частой решетке, соответствующей многозональному изображению D , формируется гиперспектральное изображение D^* .

Этап 5. Для каждого пикселя изображения D^* выполняется преобразование СХ так, чтобы в результате интегрирования ее отсчетов в диапазонах, соответствующих изображению D , сформировалось многозональное изображение D . Таким образом, в узлах частой решетки, соответствующей высокодетальному многозональному изображению D , формируется итоговое гиперспектральное изображение D^{**} , обладающее высокими и пространственным, и спектральным разрешениями.

Исследованы 3 меры оценки качества для определения эффективности предложенных алгоритмов комплексирования.

- Оценка качества функционирования алгоритмов комплексирования спектральных каналов ГСИ выполнялась на основе анализа сохранения градиентов яркости:

$$Q^{Grad} = \left[\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega_k(m,n) Q_k(m,n) \right] / \left[K \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega_k(m,n) \right], \quad (9)$$

где $Q_k(m,n)$ – степень сохранения модуля и направления градиента (оценивается с помощью оператора Собела) между результатом комплексирования B^* и k -м каналом исходного ГСИ B , $\omega_k(m,n)$ – информативность точки (m,n) в k -м канале исходного ГСИ, численно равная модулю градиента в этой точке.

- Оценка качества работы алгоритма комплексирования ГСИ и многозонального снимка выполнялась на основе индекса Wang-Bovic:

$$Q^{WB}(X,Y) = \rho_{XY} \frac{2\bar{X} \cdot \bar{Y}}{(\bar{X})^2 + (\bar{Y})^2} \cdot \frac{2\sigma_X \sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}, \quad (10)$$

где X и Y – сравниваемые эталонное и результирующее изображения; ρ_{XY} – коэффициент корреляции; \bar{X} , \bar{Y} и σ_X , σ_Y – средние яркости и СКО.

- Для оценки качества использовалась также мера

$$Q^{SY} = \frac{1}{RS} \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \alpha_{rs}, \quad (11)$$

где α_{rs} – значение спектрального угла между спектральными характеристиками точки с координатами (r,s) на изображениях X и Y .

Численные оценки качества, полученные с использованием (9), (10) и (11), приведены в главе 4.

В главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований и программная реализация алгоритмов предварительной обработки ГСИ.

Проведены экспериментальные исследования алгоритмов выравнивания пространственных разрешений от различных ОЭП, входящих в состав ГСА, предложенных в главе 2. С использованием натуральных ГСИ от КА «Ресурс-П» оценены размеры носителя фильтра, оптимальные с точки зрения максимального приближения функций передачи модуляции (ФПМ) изображений. Показано, что такими размерами являются: 3×3 для «размывающего» фильтра F_{AB} , приводящего разрешение лучшего ОЭП к худшему; 7×7 для «подчеркивающего» фильтра F_{BA} , приводящего разрешение худшего ОЭП к лучшему. Увеличение размеров фильтров не повышает качество выравнивания разрешений. Для определения эффективности выравнивания разрешений проведена оценка степени сходства ФПМ видеоданных ОЭП с использованием меры

$$E = \sqrt{\sum_{\nu} (\Phi_A(\nu) - \Phi_B(\nu))^2}, \text{ где } \Phi_A(\nu), \Phi_B(\nu) - \text{ФПМ, рассчитанные по изобра-$$

жениям $A(x, y)$ и $B(x, y)$; ν – дискретные значения пространственной частоты. В результате установлено: до обработки среднее значение, полученное по видеоданным, составило $E = 0.51$; после фильтрации «размывающим» фильтром – $E = 0.06$, «подчеркивающим» фильтром – $E = 0.15$. То есть различия по ФПМ сокращаются более чем в 3 раза.

Выполнена оценка эффективности алгоритмов комплексирования данных из различных спектральных диапазонов ГСИ с помощью меры (9). Эксперименты проведены с привлечением натуральных видеоданных от отечественных (КА «Ресурс-П» №1 и №2) и зарубежных (AVIRIS, EO-1 Hyperion) систем гиперспектральной съемки Земли. Объем статистического материала составил 10^7 пикселей ГСИ. Получены следующие результаты:

$$\gamma_1: Q^{Grad} = 0.123; \quad \gamma_2: Q^{Grad} = 0.12; \quad \gamma_3: Q^{Grad} = 0.214; \quad \gamma_4: Q^{Grad} = 0.121; \\ \gamma_5: Q^{Grad} = 0.21. \text{ При усреднении каналов ГСИ: } Q^{Grad} = 0.111.$$

Таким образом, предложенные алгоритмы комплексирования в целом обеспечивают лучшие результаты по сравнению с алгоритмом усреднения спектральных каналов.

Выполнена оценка эффективности алгоритма комплексирования ГСИ и многозонального изображения. Для этого использовались эталонные высокодетальные снимки B^* от авиационной ГСА AVIRIS. Путем усреднения и прореживания строилось ГСИ низкого пространственного разрешения, а путем объединения информации из различных спектральных каналов высокодетального ГСИ синтезировалось многозональное изображение высокого пространственного разрешения D . После этого с использованием алгоритма комплексирования выполнялось повышение разрешения на основе синтезированных данных, т.е. формировалось D^{**} . С помощью меры (11) оценивалась степень сходства эталонного высокодетального ГСИ и результата комплексирования D^{**} . При разнице пространственных разрешений изображений D и B в 14 раз получены

следующие показатели точности формирования D^{**} : ошибочных точек 8.27 % (точек, СХ которых отклоняется более чем на 5° по мере спектрального угла от СХ одноименной точки на B^*), среднее значение спектрального угла в ошибочных точках составило 7.055° , СКО – 18.73° .

В результате обработки тех же модельных данных с помощью известного алгоритма pan sharpening получены следующие оценки качества: ошибочных точек 20.23 %, среднее значение спектрального угла в ошибочных точках составило 6.764° , СКО – 23.57° . Таким образом, предложенный алгоритм комплексирования более чем в два раза превосходит по точности восстановления СХ традиционный алгоритм pan sharpening.

Оценка результатов комплексирования по мере (10) составила: $Q^{WB} = 0.973$ и $Q^{WB} = 0.952$ для предложенного алгоритма и pan sharpening соответственно.

На рисунке 3 приведены графики СХ отдельной точки на эталонном ГСИ B^* , в результате повышения разрешения на основе спектрального разделения D^{**} и на скомплексированном ГСИ по алгоритму pan sharpening. Как видим, качество восстановления СХ малых объектов (меньше проекции пикселя B) в алгоритме pan sharpening существенно ниже по сравнению с алгоритмом на основе спектрального разделения, и полученный в результате спектр близок к СХ эталонного ГСИ.

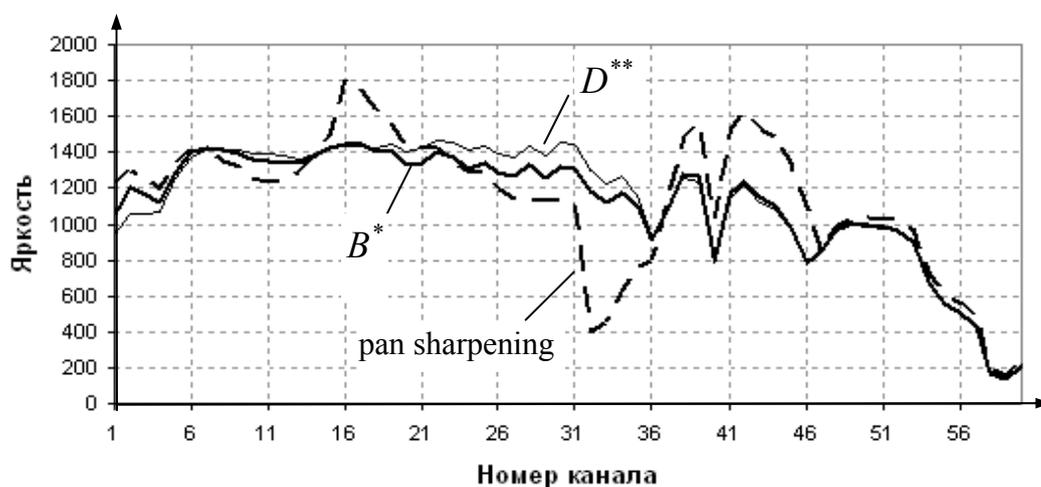


Рисунок 3 – СХ, полученные по предложенному алгоритму и алгоритму pan sharpening

Разработана технологическая линия предварительной обработки гиперспектральных данных от КА «Ресурс-П». Линия включает программные модули, реализующие предложенные в диссертации алгоритмы. Эти средства внедрены в Научном центре оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы» (г. Москва) и Ракетно-космическом центре «Прогресс» (г. Самара).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ текущего состояния и перспектив развития систем гиперспектральной съемки Земли. Проанализированы алгоритмы и технологии обработки гиперспектральной информации. Выделены основные задачи предварительной обработки ГСИ и направления работ по их решению.

2. Предложена технология формирования единого гиперспектрального изображения путем объединения информации от нескольких ОЭП гиперспектральной аппаратуры. Разработан алгоритм выравнивания пространственного разрешения видеоданных от нескольких ОЭП ГСА на основе линейной фильтрации. Предложены два подхода к поиску параметров выравнивающего фильтра в пространственной и в частотной областях. С использованием натурной информации от КА «Ресурс-П» установлено, что различия ФПМ ОЭП 1 и ОЭП 2 сокращаются примерно в 3 раза.

3. Исследованы вопросы статистической коррекции атмосферных искажений ГСИ. Предложены алгоритмы решения этой задачи. На натуральных данных выполнены их экспериментальные исследования. Подтверждена эффективность статистической коррекции атмосферных искажений в задачах, не требующих сохранения измерительных свойств ГСИ.

4. Предложен алгоритм выделения на ГСИ границ объектов на основе анализа их пространственно-спектральных характеристик. Разработана мера сходства, которая в малой степени зависит от уровня шума. С использованием натуральных ГСИ проведена отработка алгоритмов выделения границ. Показана эффективность предложенных мер в сравнении с традиционными подходами.

5. Предложены алгоритмы комплексирования данных спектральных каналов ГСА с целью повышения четкости отображения земной поверхности. Установлено, что контраст объектов после комплексирования увеличивается на 80 % по сравнению с использованием традиционных подходов.

6. Разработан алгоритм повышения детальности материалов гиперспектральной съемки Земли на основе привлечения многозональных изображений высокого пространственного разрешения. С использованием натурной информации показано, что предложенный алгоритм более чем в 2 раза превосходит по точности восстановления спектральных характеристик (по мере спектрального угла) традиционный алгоритм pan sharpening.

7. Представлена технологическая линия предварительной обработки гиперспектральных данных, получаемых ГСА космической системы «Ресурс-П». Разработаны программные модули, реализующие предложенные в диссертации алгоритмы обработки гиперспектральных данных. Эти средства используются в Научном центре оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы» (г. Москва) и Ракетно-космическом центре «Прогресс» (г. Самара).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях по списку ВАК

1. 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. М., 2010. №4. С. 38-43.

2. 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. М., 2012. №3. С. 35-39.

3. 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. М., 2013. №4. С.37-41.

4. 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. М., 2014. №3. С. 38-42.

5. Егоскин Н.А., Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Комплексирование гиперспектральных снимков Земли, полученных в различных спектральных диапазонах // Цифровая обработка сигналов. М., 2015. №3. С. 3-6.

Монография

6. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с. (в части главы 6. «Комплексирование данных дистанционного зондирования Земли от различных съемочных систем». С. 294-367).

Статьи в межвузовских сборниках

7. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Юдаков А.А. Выделение границ объектов на данных дистанционной гиперспектральной съемки Земли с применением пространственных и частотно-пространственных мер сходства // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ, 2011. Вып. 17. С. 46-49.

8. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Юдаков А.А. Новые технологии автоматического выделения границ объектов на гиперспектральных изображениях земной поверхности // Информационные технологии в научных исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2012. С. 56-61.

9. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Юдаков А.А. О сокращении размерности данных гиперспектральной съемки земной поверхности // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2013. С. 141-145.

Тезисы докладов на международных и всероссийских конференциях

10. Антонушкина С.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Первичная обработка гиперспектральных изображений поверхности Земли // Тез. докл. 16-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2010. С. 18-19.

11. Антонушкина С.В., Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Комплексирование гиперспектральной информации с панхроматическими изображениями земной поверхности // Тез. докл. 16-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2010. С. 16-17.

12. Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Классификация объектов гиперспектрального снимка по методу спектрального угла // Тез. докл. XV всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2010. С. 294-295.

13. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Вопросы анализа гиперспектральных изображений и их комплексирования с материалами спектральной съемки // Тез. докл. IX всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2011.

14. Антонушкина С.В., Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Новые возможности анализа объектов земной поверхности на основе гиперспектральной съемки // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Самара: СамНЦ РАН, 2011. С. 26-27.

15. Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Анализ границ объектов на гиперспектральных изображениях Земли с применением пространственных и частотно-пространственных мер сходства // Тез. докл. XVI всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ, 2011. С. 235-236.

16. Еремеев В.В., Макаренков А.А. Новые возможности автоматизации процессов сегментации объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки // Тез. докл. X всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2012.

17. Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Объединение гиперспектральных данных с целью повышения информативности представления объектов земной поверхности // Тез. докл. XVII всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ, 2012. С. 198-199.

18. Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Технологии комплексирования данных гиперспектральной съемки Земли с информацией от других съемочных систем // Тез. докл. X всерос. науч.-техн. конф. «Современ-

ные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2012.

19. Макаренков А.А., Юдаков А.А. Статистическая коррекция атмосферных искажений на гиперспектральных спутниковых снимках земной поверхности // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: Радиотехника, 2012. С. 54-55.

20. Макаренков А.А. Сегментация гиперспектральных снимков земной поверхности на основе корреляционного сопоставления спектральных характеристик объектов // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: Радиотехника, 2012 С. 52-53.

21. Макаренков А.А. Представление в естественных цветах данных гиперспектрального дистанционного зондирования земли // Тез. докл. 17-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2012. С. 78.

22. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Алгоритмы повышения качества отображения объектов на гиперспектральных снимках земной поверхности // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. С. 44.

23. Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Информационные технологии комплексирования материалов гиперспектральной съемки Земли с данными от других съемочных систем // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск, 2013. С. 110.

24. Еремеев В.В., Жуков Е.С., Зинина И.И., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Шебалин Ю.Г. Комплексирование гиперспектральных данных со снимками высокого пространственного разрешения // Тез. докл. 6-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2013. С.280-281.

25. Еремеев В.В., Жуков Р.Ю., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Совмещение гиперспектральных и высокодетальных снимков // Тез. докл. XI всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2013.

26. Макаренков А.А., Ушенкин В.А. Оценка качества комплексирования гиперспектральной информации // Тез. докл. 6-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2013. С.285-286.

27. Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Пресняков О.А., Юдаков А.А. Результаты обработки гиперспектральной информации КА «Ресурс-П» // Тез. докл. 6-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2013. С.283-284.

28. Еремеев В.В., Журавель Ю.Н., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Стратилатов Н.Р. Технологии обработки гиперспектральных данных // Тез. докл. XI всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2013.

29. Макаренков А.А. Оценка качества результатов комплексирования гиперспектральных изображений земной поверхности // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. С. 43.

30. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Повышение детальности гиперспектральных снимков Земли на основе привлечения материалов многозональной съемки высокого пространственного разрешения // Тез. докл. XII всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2014.

31. Еремеев В.В., Макаренков А.А. Технологии обработки гиперспектральных данных ДЗЗ // Тез. докл. XII всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2014.

32. Макаренков А.А. Спектральное разделение пикселей гиперспектрального изображения с привлечением данных многозональной высокодетальной съемки // Тез. докл. XIX всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ, 2014. С. 240-241.

33. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Макаренков А.А. Выравнивание пространственного разрешения гиперспектральных снимков Земли, полученных в различных спектральных диапазонах // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Самара: СамНЦ РАН, 2015. С. 266-268.

Макаренков Александр Алексеевич

**АЛГОРИТМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

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