

На правах рукописи



Кисляков Алексей Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ
КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 05.12.04 – «Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2013

Работа выполнена на кафедре Радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВПО Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор, заведующий кафедрой Радиотехники и радиосистем ВлГУ
Никитин Олег Рафаилович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Динамики электронных систем Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова
Брюханов Юрий Александрович

кандидат технических наук, доцент
кафедры Информатики и защиты информации ВлГУ
Тельный Андрей Викторович

Ведущая организация: МОУ «Институт инженерной физики», г. Серпухов, Московской области

Защита диссертации состоится «24» декабря 2013 г. в 18.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ФРЭМТ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ФРЭМТ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Расширение круга задач, решаемых методами дистанционного зондирования, привело к активному развитию многоканальных систем мониторинга земной поверхности, предполагающих совместное использование разнообразных приборов и датчиков: оптических, инфракрасных, микроволновых и др. Такие системы мониторинга позволяют получать информацию о наблюдаемой сцене в различных диапазонах электромагнитного излучения. Данные зондирования поступают в виде цифровых многоспектральных изображений для обработки на ЭВМ, поэтому проблематика дистанционного зондирования тесно связана с цифровой обработкой изображений.

Яркость, размеры и форма объектов на изображениях одной и той же сцены могут заметно различаться при регистрации в разных диапазонах электромагнитного излучения в зависимости от свойств поверхности объектов, а также характеристик среды. Чтобы извлечь больше информации из совокупности полученных изображений, прибегают к процедуре их комплексирования. Комплексированием изображений называется процесс объединения информации от нескольких изображений в одно более информативное, чем любое из исходных изображений.

Комплексирование изображений является сложным процессом, который включает в себя получение исходных снимков, их предварительную обработку, оценку информационного содержания, выбор количества измерительных каналов, а также саму процедуру комплексирования. Основными проблемами, возникающими при комплексировании, являются низкая контрастность снимков, высокая степень избыточности информации, и, как следствие, большой объем данных, подлежащих обработке. Существующие на сегодняшний день алгоритмы комплексирования не всегда соответствуют указанным требованиям, поэтому разработка эффективных алгоритмов комплексирования изображений, позволяющих представить регистрируемую информацию в наиболее информативном виде, является актуальной задачей и определяет необходимость проведения дальнейших исследований.

Состояние проблемы. Значительный вклад в разработку и развитие теории цифровой обработки изображений внесли отечественные ученые М.И. Кривошеев, В.А. Сойфер, М.К. Чобану, Б.А. Алпатов, Ю.С. Бехтин, Ю.В. Вильзитер, С.Ю. Желтов и зарубежные ученые: Р. Гонсалес, Р. Вудс, Д. Форсайт, Дж. Понс, У. Прэтт, и др. Исследованиями в области цифровой обработки изображений и дистанционного зондирования занимались В.К. Злобин, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов, Ю.П. Пытьев, А.И. Чуличков, Ш. Дейвис, А. Чандра, С. Гоши др.

В работе приведено продолжение исследований в области цифровой обработки изображений, разработан вариант эффективного алгоритма комплексирования цифровых многоспектральных изображений в системах дистанционного зондирования земной поверхности.

Целью работы является повышение эффективности обработки данных в многоканальных системах дистанционного зондирования земной поверхности за счет гибкого алгоритма комплексирования многоспектральных изображений.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- Анализ существующих алгоритмов комплексирования цифровых многоспектральных изображений для выявления их достоинств и недостатков при решении задач дистанционного зондирования.
- Разработка эффективного алгоритма комплексирования цифровых многоспектральных изображений земной поверхности.
- Разработка критериальной базы для количественной оценки качества работы алгоритмов комплексирования цифровых изображений.
- Изучение влияния параметров предложенного алгоритма на качество синтезируемого изображения, а также исследование его работы в условиях шумового воздействия.
- Исследование характеристик предложенного алгоритма в сравнении с другими современными алгоритмами комплексирования изображений.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе использовались современные методы цифровой обработки изображений, математического анализа, теории вероятностей, математической статистики, линейной алгебры, теории информации. Активно использовались методы имитационного и компьютерного моделирования.

Объектом исследования являются алгоритмы комплексирования цифровых многоспектральных полутоновых изображений, полученных от нескольких датчиков в различных диапазонах электромагнитного излучения.

Предметом исследования является разработка, модификация и повышение эффективности алгоритмов комплексирования цифровых многоспектральных изображений на основе усиления спектрально-цветовых отличий и цветового кодирования.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Предложен алгоритм выбора количества спектральных каналов, позволяющий сократить объем обрабатываемых данных на основе итерационно-группового алгоритма, факторного и морфологического анализа.

2. Разработан эффективный алгоритм комплексирования, включающий адаптивные методы контрастирования и эквализации гистограммы в качестве предварительной обработки данных, выбора спектральных каналов, сокращающий объем исходных данных, усиления спектрально-цветовых отличий, а также постобработки на основе цветового кодирования изображений.

3. Предложена методика количественной оценки качества работы алгоритмов комплексирования многоспектральных цифровых полутоновых изображений.

Результаты работы, имеющие практическую ценность:

1. Предложенная методика выбора количества спектральных каналов системы на основе итерационно-группового алгоритма позволяет сократить количество итераций при оценке совместной информативности набора каналов.

2. Способ оценки совместной информативности спектральных каналов с применением факторного и морфологического анализа упрощает вычисление совместной энтропии нескольких изображений.

3. Гибкий алгоритм выбора количества спектральных каналов позволяет сократить объем обрабатываемых данных в среднем на 25% на первом этапе и до 60% на втором, при общих потерях полезной информации не более 15 %.

4. Алгоритм комплексирования цифровых полутоновых изображений на основе метода усиления спектрально-цветовых отличий и цветового кодирования превосходит известные на сегодняшний день классические алгоритмы комплексирования на основе анализа главных компонент и вейвлет-преобразования и др. по критерию информационной энтропии на 10%, по отношению сигнал-шум на 3-4 дБ.

5. При помощи компьютерного моделирования определены параметры разработанного алгоритма комплексирования, обеспечивающие наилучшие показатели синтезированного изображения по информационной емкости и шумовым характеристикам при наименьшем объеме входных данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика выбора количества спектральных каналов системы на основе итерационно-группового алгоритма.

2. Алгоритм сокращения объема полученных данных с применением факторного и морфологического анализа.

3. Алгоритм комплексирования цифровых многоспектральных полутоновых изображений.

4. Методика количественной оценки качества работы алгоритмов комплексирования цифровых многоспектральных полутоновых изображений.

Результаты работы внедрены в ЗАО «Научно-исследовательский внедренческий центр автоматизированных систем» (г. Москва), а также используются в учебном процессе на кафедре радиотехники и радиосистем ВлГУ, по выполняемым грантам РФФИ и НИР.

Личный вклад автора заключается в разработке общей идеи и главных положений исследования, определении степени актуальности и способов решения проблемы, теоретическом обобщении результатов исследования, представленных в диссертации и в опубликованных работах.

Апробация работы Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня:

1. Девятой-десятой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Владимир-Суздаль 2011 г. и 2013 г.

2. Десятой международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», Владимир-Суздаль 2012 г.

3. Тридцать первой и тридцать второй Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», Серпухов 2012 и 2012 гг.

4. Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники», Владимир 2012 г.

5. Всероссийской молодежной научной конференции «Научный потенциал молодежи – будущее России»: Четвертые Всероссийские научные Зворыкинские чтения, Муром 2012 г.

Публикации по теме работы. По тематике исследований опубликована 21 научная статья, 4 из которых в изданиях, рекомендованных

ВАК РФ, а также одна статья – в зарубежном издании. Кроме того, получено два патента на полезную модель в 2011 и 2012 гг., а также авторское свидетельство на программное обеспечение в 2013 г. Подана заявка на патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 92 наименований и 23 работ автора и 1 приложения. Общий объем диссертации 203 страницы машинописного текста, включая 199 страниц основного текста, 4 страницы приложений, 97 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе, имеющей обзорный характер, рассмотрены методы получения данных дистанционного зондирования в виде цифровых многоспектральных изображений. Проведен сравнительный анализ многоспектральных снимков на примере данных, полученных с помощью оборудования современного спутника дистанционного зондирования Landsat 8, определены их возможности. Рассмотрены известные алгоритмы комплексирования цифровых полутоновых изображений. Приведено описание математического аппарата современных методов комплексирования, выделены достоинства методов и их недостатки при решении практических задач дистанционного зондирования.

Одним из наиболее современных источников получения многоспектральных снимков является оборудование спутника дистанционного зондирования Landsat 8, который был запущен NASA 11 февраля 2013 г.

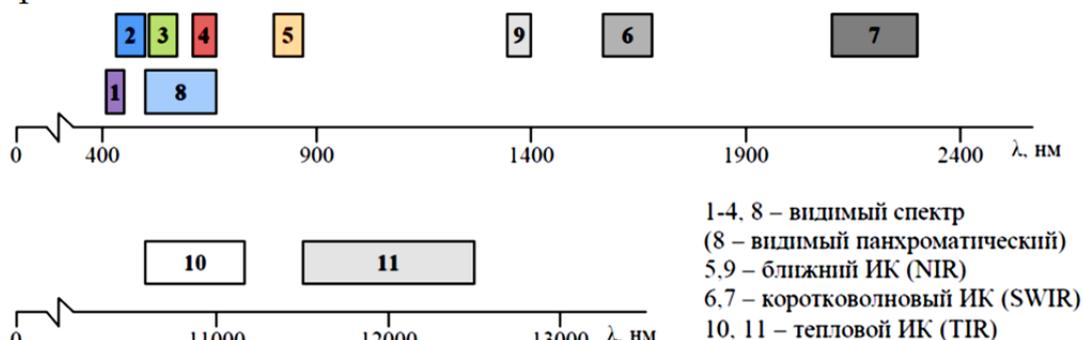


Рисунок 1. Спектральные диапазоны оборудования спутника Landsat 8.

В Landsat 8 изображение проходит через 11 отдельных линеек сенсоров, каждая из которых работает в своем диапазоне. Совместное использование полученных снимков расширяет возможности измерения характеристик подстилающих покровов при дальнейшей обработке данных.

Комплексирование (англ. fusion– интеграция, объединение, слияние, сращивание, сплавление) определяется как класс методов и средств, использующих данные нескольких сенсоров различной природы.

Комплексирование изображений может иметь различные цели, например, увеличение пространственного разрешения или повышение резкости изображения. Однако основной целью является сокращение объема передаваемых данных путем синтеза высококачественного изображения подстилающей поверхности из набора исходных многоспектральных изображений.

Задача комплексирования изображений состоит в выделении отличительных особенностей изображений и представлении максимального количества информации, содержащейся в исходных изображениях в одно результирующее изображение с минимальными потерями.

При комплексировании изображений на пиксельном уровне используются математические методы, классификация которых показана на рисунке 2.

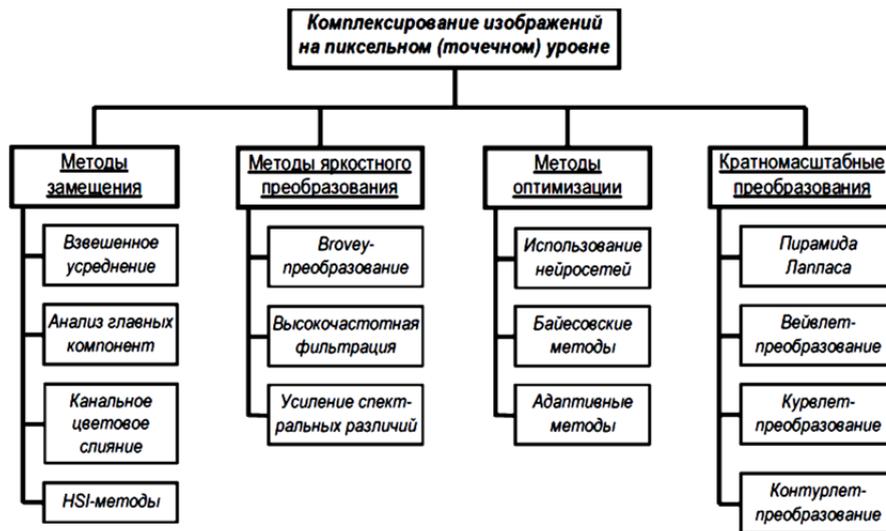


Рисунок 2. Классификация методов, используемых при комплексировании цифровых изображений на пиксельном уровне.

Комплексирование изображений от разных источников позволяет выделить дополнительную информацию, которая не проявляется в отдельном методе визуализации. Методы комплексирования изображений относятся к синергетическим технологиям, поскольку при совместном анализе данных полученная информация является не избыточной, а комплементарной, при которой различные источники удачно дополняют друг друга.

Анализ возможностей современных алгоритмов комплексирования применительно к задачам дистанционного зондирования позволил выбрать методы, которые необходимо применить для повышения эффективности процедуры комплексирования:

- 1) Адаптивные методы сокращения объема исходных данных: факторный и морфологический анализ.
- 2) Методы яркостного преобразования на основе усиления спектральных отличий.
- 3) Метод замещения: анализ главных компонент, использование цветовой модели HSI (от англ. Hue, Saturation, Intensity – тон, насыщенность, яркость).

Вторая глава посвящена разработке гибкого алгоритма комплексирования цифровых многоспектральных изображений на основе усиления спектрально-зональных отличий, с применением методов факторного, морфологического анализа и цветового кодирования.

Для решения основной задачи комплексирования необходимо выделить отличительные особенности исходных изображений и выполнить процедуру слияния. За счет увеличения информационной емкости результирующее изображение обеспечит лучшее восприятие для человеческого и компьютерного зрения.

Комплексирование изображений состоит из следующих этапов: предварительной обработки, анализа информационного содержания, минимизации объема исходных данных, самой процедуры слияния, постобработки и визуализации полученных результатов.

Предварительная обработка включает в себя яркостные преобразования, выполняемые с целью улучшения характеристик качества изображений путем поэлементного и группового преобразования:

1) Повышение контрастности изображений с применением методов адаптивного контрастирования.

2) Адаптивная эквализация гистограммы.

3) Повышение резкости изображения с использованием процедуры локальной фильтрации с усилением высоких частот.

Оценка информационного содержания изображений. Основным критерием оценки качества изображений является их информативность.

В качестве меры информативности изображений используется понятие информационной энтропии Шеннона, устанавливающей среднее количество информации на пиксель изображения. Для полутонового изображения A с плотностью вероятности яркости пикселя $w(A)$ и интервалом возможных значений яркости $[0, L]$, $L = 255$, энтропия рассчитывается по формуле:

$$E(A) = -\sum_{k=0}^L w_k(A) \cdot \log_2[w_k(A)].$$

Для пары полутоновых изображений A и B совместная энтропия определяется следующим образом:

$$E(A, B) = -\sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L w_{kl}(A, B) \cdot \log_2[w_{kl}(A, B)].$$

Двумерная плотность вероятности $w(A, B)$ характеризует совместные статистические свойства двух изображений A и B .

Совместная информативность набора изображений является важным критерием оценки «полезности» отдельных каналов. Если каналы полностью не зависят друг от друга, то сумма их собственных энтропий равна совместной энтропии, если же они как-то сопряжены друг с другом, то совместная энтропия меньше этой суммы.

Рассмотрим пример оценки информационного содержания набора многоспектральных изображений, полученных с помощью оборудования спутника Landsat 8 13 мая 2013 г. для одного из участков земной поверхности.

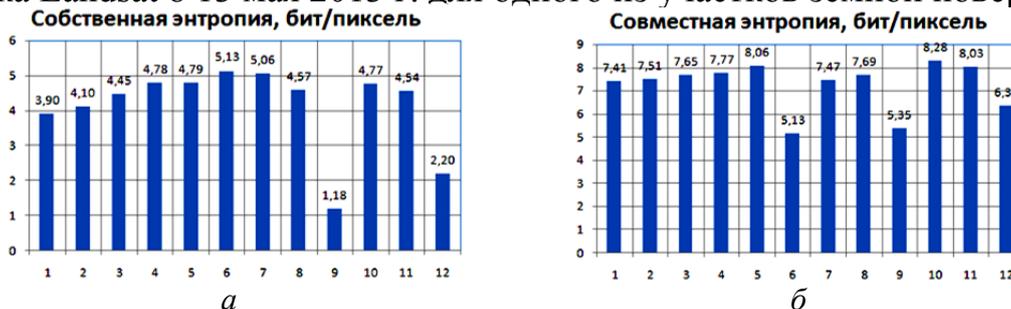


Рисунок 3. Количественная оценка информационной энтропии изображений Landsat 8.

Диаграммы на рисунке 3а показывают, что наибольшее значение собственной энтропии имеет снимок в 6-м диапазоне, а наименьшее – в 9-м. Совместная энтропия в данном случае была рассчитана относительно наиболее информативного изображения. При этом наибольшую совместную информативность имеет 10-й диапазон (рисунок 3б). Остальные каналы, либо в силу высокой корреляции (около 0,9), либо малого значения собственной энтропии имеют низкую совместную информативность, что создает предпосылки для минимизации количества информации.

Минимизация объема данных. Подход к сокращению объема данных основывается на оценивании возможного вклада каждого спектрального канала в решение поставленной задачи и выборе такой комбинации многоспектральных изображений, которые в совокупности дают максимальное сокращение объема данных при минимальных потерях информации.

Алгоритм поиска оптимального набора каналов строится на основе перебора всех возможных сочетаний по n каналов из полного числа N каналов по критерию максимума совместной энтропии. При этом возникают следующие проблемы: критерий информативности сложен для непосредственного счета, что затрудняет реализацию метода полного перебора при большом количестве каналов, кроме того, прямое определение совместной энтропии каналов при $N > 3$ практически невозможно, так как требует большого числа степеней свободы. Для решения данных проблем применяются следующие приемы:

1) Последовательный выбор каналов не обеспечивает оптимальной совокупности каналов, тогда как полный перебор обычно превосходит возможности современных ЭВМ, и является нерациональным. Компромисс заключается в построении итерационно-группового алгоритма выбора каналов.

Сначала путем последовательного отбора находят некоторую начальную конфигурацию заданного числа каналов. Затем предпринимаются попытки улучшить эту конфигурацию путем замены любого из выбранных каналов на один из «свободных» каналов. Если очередная попытка удастся, то производится фактическая замена и процесс продолжается дальше, т.е. возникает конфигурация каналов, которая имеет максимальную информативность. Эта конфигурация лучше, чем полученная в результате последовательного выбора, однако неизвестно насколько она далека от оптимальной.

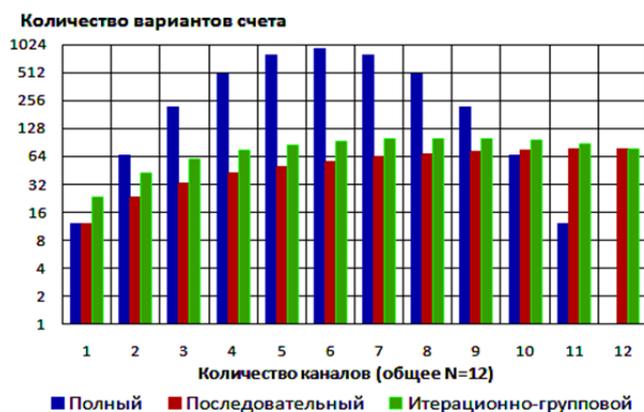


Рисунок 4. Сравнение вычислительной сложности различных методов минимизации числа спектральных каналов.

2) Так как полутоновые изображения имеют 256 градаций яркости, то для оценки совместной энтропии требуется примерно 256^N измерений. Задачу можно решить, если разложить N -мерный набор изображений по независимым составляющим. Затем для каждой независимой компоненты определить собственную энтропию.

Для преобразования обычно используют метод главных компонент. Яркости в каналах всегда в какой-то степени коррелируют друг с другом, и их можно отобразить как функции от нескольких независимых факторов.

Приведем статистические параметры для 12 каналов и их факторное отображение. Разложение осуществляется на основе яркостных коэффициентов корреляции между каналами таким образом, что первый фактор описывает наиболее общую часть варьирования, объединяющую все переменные, второй и последующие – меньшую по убыванию, последний – оставшуюся. Общее количество значимых факторов зависит от степени корреляции между каналами и обычно ограничивается 4-5 факторами, которые описывают 99,7 % информации всех каналов.

Таблица 1. Факторные нагрузки – коэффициенты корреляции исходных данных и факторов.

№ канала	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
1	0,97	0,22	0,10	-0,05	0,06
2	0,96	0,25	0,08	0,02	0,06
3	0,97	0,09	0,02	-0,20	-0,09
4	0,98	0,19	-0,03	0,07	-0,04
5	0,97	-0,17	0,17	0,03	0
6	0,99	0,13	-0,06	0,05	-0,03
7	0,97	-0,19	0,16	0,03	0
8	0,99	0,09	-0,08	0,04	-0,03
9	0,99	-0,02	-0,11	0,03	0
10	0,99	-0,07	-0,12	0,01	0,02
11	0,94	-0,33	0,00	0,02	-0,05
12	0,96	-0,21	-0,12	-0,09	0,10
Дисперсия	11,35	0,40	0,12	0,06	0,03
Дисперсия, %	94,62	3,37	1,02	0,52	0,27

В общем случае можно выполнить разложение N каналов через n факторов. Построив гистограммы распределения по каждому фактору, можно определить их собственную энтропию, а затем совместную энтропию для N каналов.

В результате разложения по факторам степень корреляции между полученными изображениями удается снизить с «очень сильной» (0,8-0,9) до «слабой» (0,3-0,5) в зависимости от сравниваемых изображений.

Таким образом, на начальном этапе необходимо выбрать нужное количество каналов путем сравнения совместных энтропий. Для этого рациональнее распределить каналы в порядке убывания их собственной энтропии (рисунок 5а), а затем вычислить совместную энтропию для различного количества каналов используя метод последовательного выбора.

Диаграммы на рисунке 5б показывают, что наибольшую информативность имеет комбинация из всех 12 каналов, однако разница между значениями информативности для 9 и 12 каналов составляет 10%, что позволяет использовать набор из 9 каналов с номерами 6,7,5,4,10,8,11,3,2 для дальнейших расчетов. Так при потере 10,83 % общей информации, объем данных сокращается на 25%.

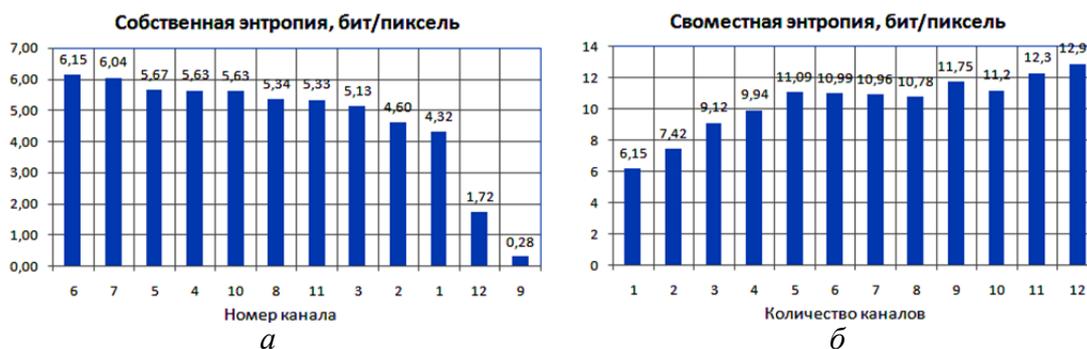


Рисунок 5. Собственная информативность отдельных каналов (а) и совместная информативность для различного количества каналов (б).

Для того чтобы учесть информацию оставшихся трех «свободных» каналов, используется последовательная замена каждого из оставшихся каналов на один из выбранных, после чего проводится расчет совместной энтропии получившейся комбинации каналов. В случае улучшения результата каналы сменяют друг друга.

В результате наиболее выгодным с точки зрения информативности в рассматриваемом примере является набор, состоящий из 9 каналов с номерами 6,1,10,4,5,8,11,3,2 (канал №7 был заменен на канал №1). При этом выбранные каналы содержат уже 94,07% информации всей совокупности каналов. Учет информации «свободных» каналов информации дает прирост совместной энтропии на 4%. В результате, общие потери информации составляют 5,93% при сокращении объема данных на 25%.

Морфологический анализ изображений. Не смотря на то, что конкретные значения яркости изображений оказываются различными, общая форма изображения в целом может сохраняться для аналогичных участков сцены. Это также дает предпосылки для сокращения количества каналов.

Сравнение изображений $f(x,y)$ и $g(x,y)$ в рамках морфологии Пытьева осуществляется при помощи нормированных морфологических коэффициентов корреляции Пытьева

$$K_M(g, F) = \frac{\|P_F g\|}{\|g\|}, K_M(f, G) = \frac{\|P_G f\|}{\|f\|}.$$

$\|g\|$ и $\|f\|$ – нормы изображений g и f , $\|P_F g\|$, $\|P_G f\|$ – нормы проекций изображения g на форму изображения f ; и f на форму g соответственно. Здесь в первом случае изображение g сравнивается с формой изображения f , во втором случае, наоборот, изображение f сравнивается с формой изображения g . В общем случае $K_M(g, F) \neq K_M(f, G)$.

Данный тип корреляции называется яркостно-геометрической (морфологической). Следует отметить, что процедура выбора каналов, описанная выше, также может быть применена и для морфологических коэффициентов корреляции.

График совместной информативности изображений (рисунок 6), рассчитанный на основе морфологических коэффициентов корреляции, имеет расхождение с графиком совместной информативности, рассчитанной по яркостным коэффициентам корреляции. При этом наблюдается снижение прироста информативности при увеличении количества каналов. Это означает, что по яркостным свойствам изображения менее схожи, чем по яркостно-геометрическим свойствам.

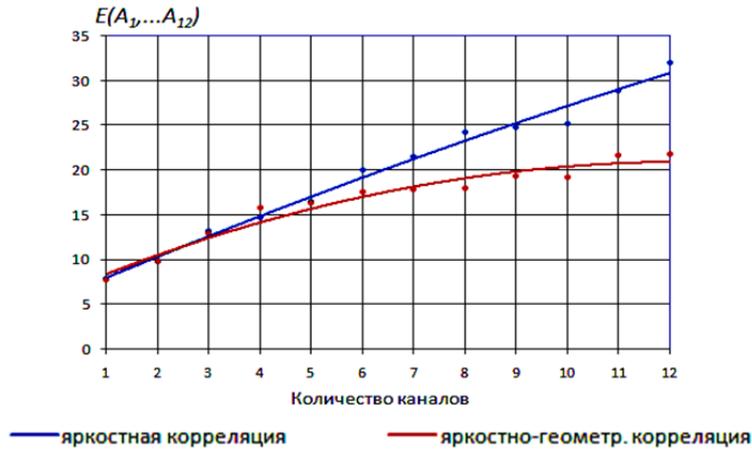


Рисунок 6. Зависимости совместной энтропии от количества каналов.

Так как исследуемые изображения имеют большую степень корреляции по форме, чем по яркости, совместная информативность, рассчитанная на основе яркостно-геометрических коэффициентов корреляции ниже.

Процедура усиления спектрональных отличий. Для учета отличий отражательной способности точек местности в конкретных зонах спектра, вводится коэффициент γ , определяющий степень усиления различий между изображениями. В результате усиления спектрональных различий с учетом коэффициента γ , из b_1, b_2, \dots, b_N формируются изображения $b_1^*, b_2^*, \dots, b_N^*$ следующим образом:

$$b_i^*(x, y) = \gamma \cdot b_i(x, y) + \frac{1}{N} \cdot (1 - \gamma) \cdot \sum_{i=1}^N b_i(x, y), i = 1, 2, \dots, N,$$

$$\gamma = \frac{d_C}{d_{\Pi}}, \quad d_{\Pi} = \frac{1}{N} \cdot \left| \sum_{k=1}^N b_k \right|, \quad d_C = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N b_k^2}.$$

где d_{Π} и d_C – меры различимости точек в спектрональном пространстве при панхроматической и спектрональной съемке соответственно.

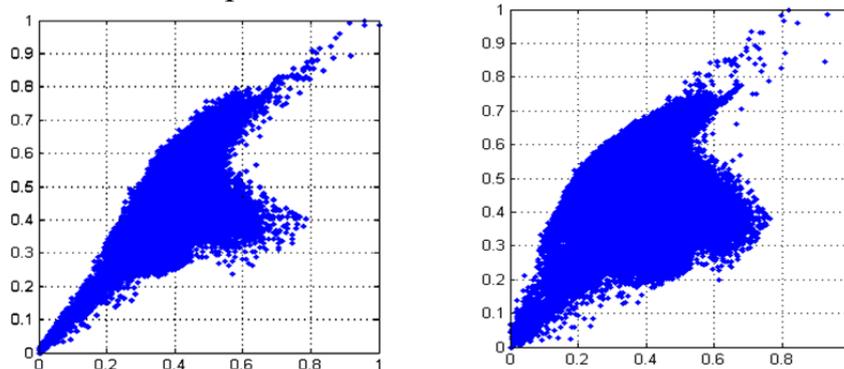


Рисунок 7. Результат усиления отличий между 5-м и 6-м каналами.

Результирующее изображение $f(x, y)$ формируется на базе наиболее информативного исходного изображения b_0 , по следующему правилу:

$$f(x, y) = b_0^*(x, y) \cdot \left[1 + (t_1(x, y) - \bar{t}_1) \right],$$

где \bar{t}_1 – среднее значение переменной $t_1(x, y)$, которая в данном случае характеризует относительные спектрональные отличия базового изображения от изображений остальных каналов:

$$t_1(x, y) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} [\theta_0(x, y) - \theta_i(x, y)]^2}.$$

Здесь $\theta_0(x, y) = b_0^*(x, y)/B(x, y)$, $\theta_i(x, y) = b_i^*(x, y)/B(x, y)$.

$B(x, y) = \left[\sum_{i=1}^N b_i^*(x, y) \right] / N$ – модель панхроматического изображения, N – количество ранее выбранных каналов.

Результатом такой обработки является удаление точек от биссектрисы в спектрально-пространстве двух изображений, увеличивающее разнообразие по яркости между изображениями.

Постобработка с применением методов цветового кодирования. Цветовое кодирование изображений осуществляется в два этапа: первый этап заключается в переходе к цветовой модели HSI, вычислении цветового тона насыщенности и интенсивности. На втором этапе проводится замена составляющей интенсивности на полутоновое изображение, полученное в результате процедуры комплексирования, затем осуществляется переход к модели RGB для визуализации. Цветовой тон H определяется по формуле:

$$H(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } v_1 = 0, v_2 = 0, \\ \arctg(v_2/v_1) + 2\pi, & \text{при } v_1 \geq 0, v_2 < 0, \\ \arctg(v_2/v_1), & \text{при } v_1 \geq 0, v_2 \geq 0, \\ \arctg(v_2/v_1) + \pi, & \text{при } v_1 < 0, \end{cases}$$

$$v_1 = \sum_{i=1}^N d_n(x) \cdot \cos(\varphi_i),$$

$$v_2 = \sum_{i=1}^N d_n(x) \cdot \sin(\varphi_i),$$

$$\varphi = (360^\circ/N) \cdot (i-1), \quad i = 1, \dots, K.$$

Насыщенность S и интенсивность I для N каналов определяется как:

$$S(x) = 1 - \frac{\min\{d_i(x)\}}{\max\{d_i(x)\}}, \quad i = 1, \dots, K, \quad I(x) = \frac{\max\{d_i(x)\}}{MAX}, \quad i = 1, \dots, N$$

где MAX – максимальное значение яркостей пикселей изображений всех каналов. В формулах полагается, что значения I и S лежат в пределах 0 до 1, а угол H отсчитывается против часовой стрелки.

Третья глава посвящена исследованию возможностей разработанного алгоритма, путем математического моделирования его работы в условиях различных искажающих факторов, а также разработке критерия оценки качества работы алгоритма комплексирования.

1. Для формирования комплексной оценки качества рассматриваются такие параметры изображений как: среднеарифметическое значение яркостей \bar{L} , которое определяет уровень адаптации к зрительной системе человека L_Q , полнота использования градаций яркостей K_Q , дисперсия σ , резкость изображения R_Q , его абсолютный контраст K , средняя яркость L_n , количество используемых уровней яркости N_n и энтропия E . Степень важности для частных показателей качества определяется на основе экспертных оценок, а весовые коэффициенты – по критерию Фишберна.

Выражение для количественной оценки визуального качества полутоновых изображений Q имеет вид:

$$Q = 0,250 \cdot L_Q + 0,222 \cdot K_Q + 0,194 \cdot L_n + 0,167 \cdot \sigma + 0,139 \cdot K + 0,111 \cdot R_Q + 0,083 \cdot N_n + 0,056 \cdot E.$$

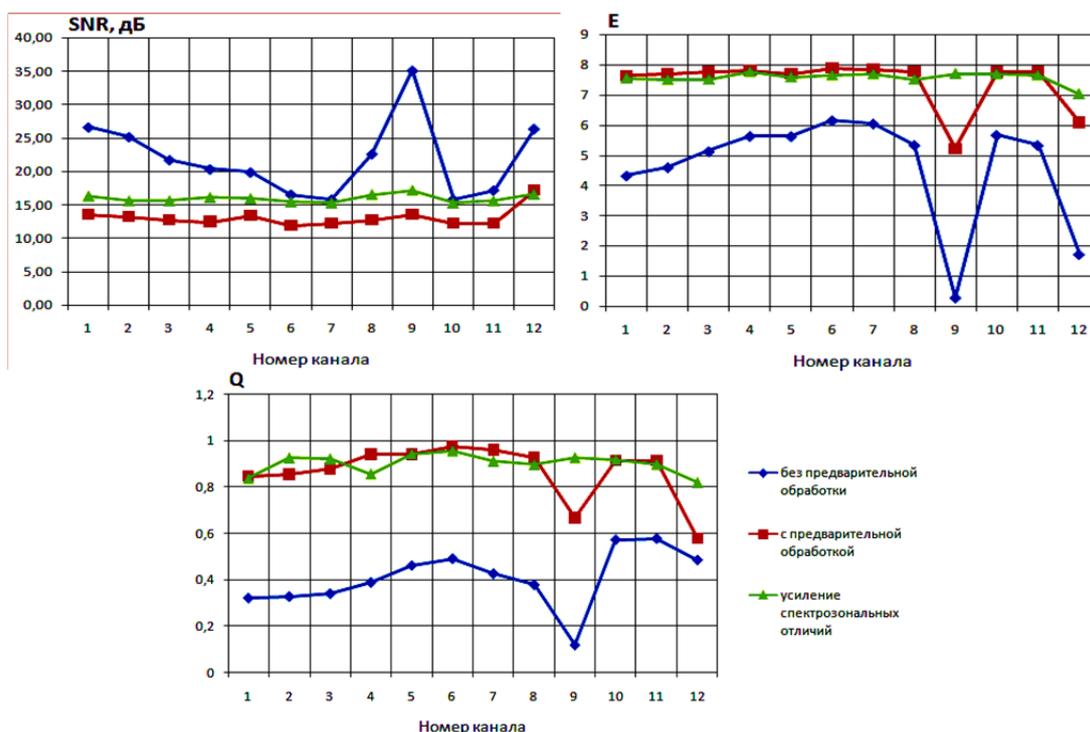


Рисунок 8. Показатели качества изображений.

На рисунке 8 приведены сравнительные характеристики исходных снимков, изображений после предварительной обработки, а также после усиления спектральных отличий, которые показывают, что при некотором ухудшении отдельных показателей качества (энтропии, контраста), набор изображений становится более выровненным по качеству, что в итоге положительно влияет на результат комплексирования.

2. Для исследования работы алгоритма отбора каналов в условиях шумового воздействия на изображение рассмотрим зависимость совместной информативности от количества каналов в наборе.

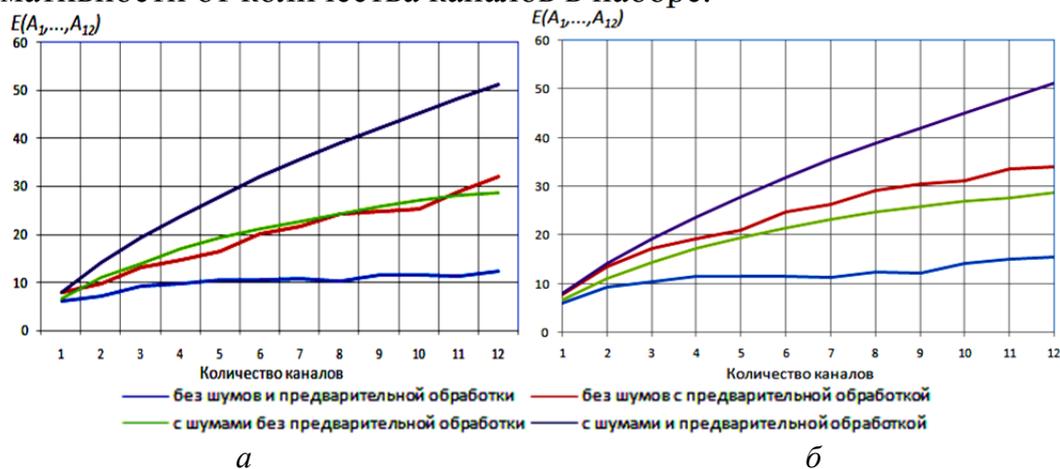


Рисунок 9. Совместная информативность до (а) и после замены каналов.

Искажения в виде аддитивных, мультипликативных и аппликативных шумов влияют на точность оценки совместной информативности изображений делая зависимость ее прироста (сокращения) от числа каналов более сглаженной за счет прибавления одинаковых «порций» информации, которая обусловлена только наличием шумов, поэтому прирост информации

оказывается «ложным», при этом замена каналов не дает изменения совместной энтропии набора каналов.

3. Моделирование работы алгоритма комплексирования с различным количеством спектральных каналов.

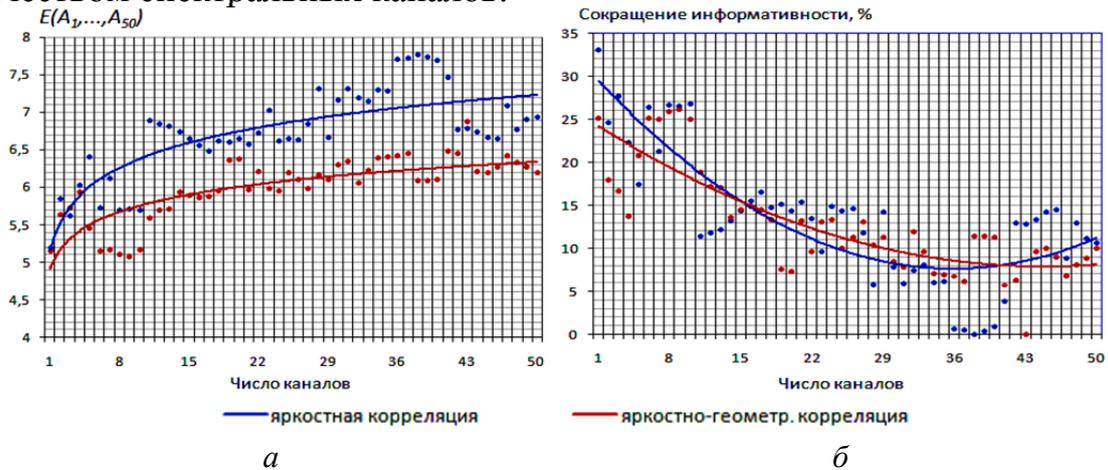


Рисунок 10. Зависимости совместной энтропии (а) и процента потерь информации (б) от количества каналов.

При использовании гиперспектральных снимков относительный уровень потерь информации снижается, причем изначально прирост совместной информативности был меньше, чем при использовании многоспектральных снимков, которые имеют меньшую степень корреляции как по яркости, так и по форме. Поэтому, разработанный алгоритм эффективнее применять при низкой степени зависимости между изображениями, что позволяет увеличить точность выбора эффективного количества каналов и минимизировать потери информации при максимальном сокращении объема данных.

3. Исследование алгоритма усиления спектрально-зональных отличий.

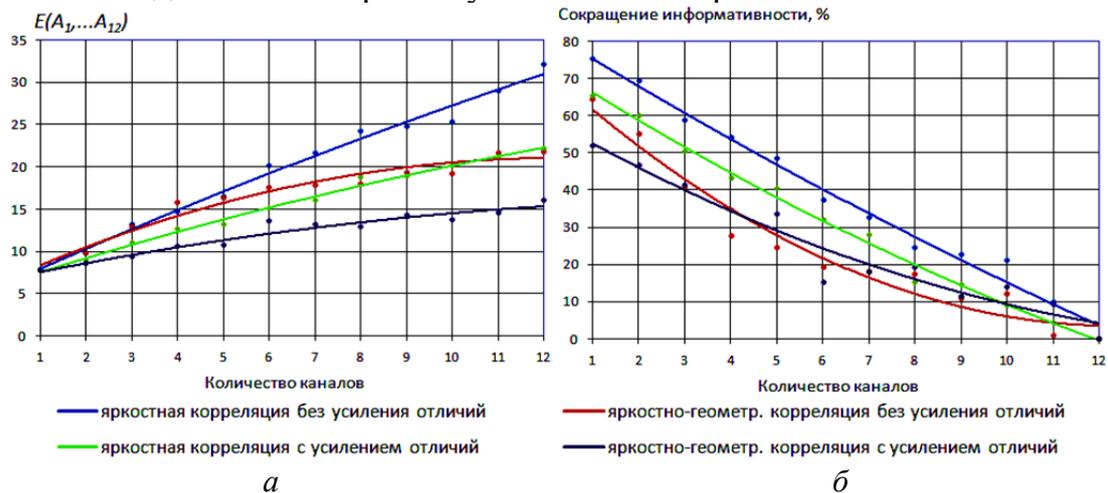


Рисунок 11. Зависимость совместной энтропии (а) и процента потерь информации от количества каналов (б) до и после процедуры усиления спектрально-зональных отличий.

Графики на рисунке 11 показывают снижение прироста совместной энтропии при расчете на основе как яркостных, так и морфологических коэффициентов корреляции. Увеличение отношения сигнал-шум дает основание полагать, что прирост информации характеризуется не наличием шумов, а добавлением новой информации к полученной совокупности каналов, поэтому графики носят более пологий характер.

Четвертая глава посвящена сравнительной оценке современных алгоритмов комплексирования с разработанным алгоритмом по различным характеристикам результирующих изображений.

Характеристики результирующих изображений получены на основе репрезентативного количества наборов многоспектральных снимков, каждый из наборов включает 12 каналов. Изображения отбирались таким образом, чтобы охватить максимально большее разнообразие подстилающих поверхностей при различных погодных условиях.

Таблица 2. Характеристики результирующих изображений.

№	Базовый математический метод алгоритма комплексирования	Информационная энтропия, E	СКО, σ	Контраст, C	Отношение сигнал-шум, дБ	Показатель качества, Q
<i>Полутонные изображения</i>						
1	Усреднение	7,38	0,17	0,37	14,57	0,85
2	Анализ главных компонент	7,57	0,19	0,40	13,93	0,90
3	Вейвлет-преобразование	7,50	0,21	0,42	13,46	0,85
4	Разделение на НЧ и ВЧ компоненты	7,21	0,15	0,29	16,66	0,79
5	Усиление спектрально-зональных отличий	7,84	0,12	0,46	14,90	0,94
<i>Цветные изображения</i>						
1	Усреднение	7,72	0,21	0,42	12,46	0,962
2	Анализ главных компонент	7,68	0,26	0,51	11,82	0,935
3	Вейвлет-преобразование	7,60	0,26	0,52	11,73	0,924
4	Разделение на НЧ и ВЧ компоненты	7,70	0,23	0,46	12,77	0,921
5	Усиление спектрально-зональных отличий	7,76	0,24	0,47	13,57	0,989

Анализ характеристик результирующих изображений показывает, что разработанный гибкий алгоритм комплексирования эффективен и не уступает, а по некоторым характеристикам, превосходит известные на сегодняшний день алгоритмы и может быть успешно использован для решения задач дистанционного зондирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Рассмотренные алгоритмы и методы повышения эффективности процедуры комплексирования изображений были апробированы с привлечением данных спутника Landsat 8, а также гиперспектральных изображений спутника EO-1 Hyperion. Использование перечисленных алгоритмов отбора каналов позволяет сократить объем оперируемых данных до 60% при потере от 15 до 30% полезной информации.

2. Использование морфологического анализа при расчете совместной энтропии изображений позволяет дополнительно сократить объем оперируемых данных на 10-15% при минимальных потерях геометрической информации.

3. Предложенный алгоритм комплексирования изображений позволяет получать цветные изображения с улучшенными характеристиками дешифруемости за счет усиления отличительных признаков одноименных областей (объектов) на изображениях различных спектральных диапазонов. Совместное использование алгоритмов сокращения объема данных системы и

алгоритма комплексирования на основе усиления спектральных отличий с использованием цветового кодирования обеспечивает повышение на 15-20% качества и на 10 % информативности результирующего изображения по отношению к полутонному изображению от самого информативного спектрального канала.

4. Усиление спектрально-зональных отличий позволяет ослабить негативные тенденции, которые наметились после проведения процедуры предварительной обработки, а именно: ухудшение шумовых характеристик и появления «ложного» прироста совместной информативности, увеличивая отношение сигнал-шум на 3-4 дБ при сохранении качества.

5. При использовании гиперспектральных снимков уровень относительных потерь информации снижается в 2-3 раза по сравнению с многоспектральными за счет высокой степени зависимости между каналами.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

Статьи в журналах ВАК

1. Кисляков А.Н. Комплексирование данных многоспектрального дистанционного зондирования лесных массивов / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Проектирование и технология электронных средств. – Владимир. – 2010, №2. – С. 23-27 (соискатель - 33%).
2. Кисляков А.Н. Моделирование работы алгоритма комплексирования многоспектральных изображений земной поверхности / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Проектирование и технология электронных средств. – Владимир. – 2011, № 2. – С. 50-54 (соискатель - 50%).
3. Кисляков А.Н. Цветовое кодирование изображений в многоканальных системах дистанционного зондирования земной поверхности / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань. – 2013, № 1. – С. 116-120 (соискатель - 50%).
4. Кисляков А.Н. Комплексирование многоспектральных изображений с использованием методов морфологического анализа и цветового кодирования / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – Муром. – 2013, № 1. – С. 52-57 (соискатель - 50%).

Статьи в зарубежных научных журналах

1. Kislyakov A.N. Fusion of multispectral images using morphological analysis methods / O.R. Nikitin, A.N. Kislyakov // International journal «Indian Science Cruiser (ISC)», Institute of Science, Education and Culture – Kolkata, India, vol. 26, num. 5, September 2012, – P. 35-39(соискатель - 50%).

Материалы российских и международных конференций

1. Кисляков А.Н. Комплексирование измерительной информации многоканального дистанционного зондирования земной поверхности / А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Материалы IX-й международной научно-

- технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». – Владимир-Суздаль, – 2011.
2. Кисляков А.Н. Оценка информативности многоспектральных изображений земной поверхности / А.Н. Кисляков // Материалы X Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ-2012). – Владимир-Суздаль, – 2012. Т.3. – С.161-165.
 3. Кисляков А.Н. Алгоритм радиометрического комплексирования данных многоканального мониторинга земной поверхности / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // тез. докл. IV Всероссийской межвузовской научной конференции «Зворыкинские чтения». – Муром, – 2012. – С. 572-573.
 4. Кисляков А.Н. Алгоритм морфологического комплексирования многоспектральных изображений земной поверхности / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Материалы XXXI Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», филиал ВА РВСН им. Петра Великого. – Серпухов.: Труды конференции ч.3, – 2012. – С. 118-124.
 5. Кисляков А.Н. Алгоритм морфологического комплексирования многоспектральных изображений земной поверхности / А.Н. Кисляков // Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники» (ПУВТ-2012). – Владимир, – 2012 – С.91-94.
 6. Кисляков А.Н. Морфологическое комплексирование многоспектральных изображений земной поверхности / А.Н. Кисляков // Доклад научно-практической конференции «Дни науки ВлГУ-2012» – Владимир, – 2012.
 7. Кисляков А.Н. Комплексирование многоспектральных изображений дистанционного зондирования земной поверхности / А.Н. Кисляков // Материалы X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов (и др.) – Владимир: ВлГУ т. 2, – 2013, – 204 с. – С. 44-47.
 8. Кисляков А.Н. Оптимизация количества спектральных каналов в системах дистанционного зондирования земной поверхности / А.Н. Кисляков // Материалы XXXII Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», филиал ВА РВСН им. Петра Великого, 26-28 июня 2013 г. – Серпухов.: Труды конференции ч.5, – 2013. – 386 с. – С. 292-296.

Статьи в прочих научных изданиях

1. Кисляков А.Н. Метод микроволнового многоспектрального дистанционного зондирования в задаче мониторинга лесных массивов / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Труды Владимирского государственного университета. Выпуск 7: физико-математические основы индустрии наносистем и материалов. – Владимир, – 2010. – С 66-70 (соискатель - 33%).
2. Кисляков А.Н. Мониторинг лесных массивов методом многоспектрального дистанционного зондирования / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – Муром, – 2011. № 1. – С.50-52 (соискатель - 33%).

3. Кисляков А.Н. Комплексирование данных многоканального мониторинга земной поверхности / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Методы и устройства передачи и обработки информации. – Муром, – 2011. № 1. – С.68-71 (соискатель - 33%).
4. Кисляков А.Н., Применение комплексных систем многоспектрального дистанционного зондирования в задачах экологического мониторинга / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Методы и устройства передачи и обработки информации. – Муром, – 2011. № 1. – С.72-76 (соискатель - 33%).
5. Кисляков А.Н. Радиометрическое комплексирование многоспектральных изображений земной поверхности / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков, А.А. Шулятьев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – Муром, – 2012. №1. – С. 54-58 (соискатель - 33%).
6. Кисляков А.Н. Морфологическое комплексирование многоспектральных изображений земной поверхности / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков// Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – Муром, – 2012. №2.– С. 36-39 (соискатель - 50%).
7. Кисляков А.Н. Комплексирование многоспектральных изображений земной поверхности с использованием методов морфологического анализа / О.Р. Никитин, А.Н. Кисляков// Методы и устройства передачи и обработки информации. – Муром, – 2012. № 4. – С. 52-57 (соискатель - 50%).

Патенты на полезные модели

1. Кисляков А.Н. Устройство для дистанционной идентификации типов растительности / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // Патент на полезную модель № 108837 от 11.05.2011 (соискатель - 33%).
2. Кисляков А.Н. Устройство радиометрического комплексирования цифровых многоспектральных изображений земной поверхности / Никитин О.Р., Кисляков А.Н., Шулятьев А.А. // Патент на полезную модель № 115884 от 22.11.2011 (соискатель - 33%).

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Кисляков А.Н. Программное обеспечение для морфологического комплексирования многоспектральных изображений / Никитин О.Р., Кисляков А.Н. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013610882 от 09.01.2013 г. (соискатель - 50%).

Подписано в печать 20.11.2013.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.