

На правах рукописи



ЕРЕМЕЕВ Виктор Андреевич

**АЛГОРИТМЫ АНАЛИТИКО-НЕЙРОСЕТЕВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ
СЪЕМКИ ЗЕМЛИ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2025

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

Научный руководитель: **Макаренков Александр Алексеевич**
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИИ «Фотон» РГРТУ

Официальные оппоненты: **Кузнецов Павел Константинович**
доктор технических наук, профессор Электротехнического факультета ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Ташлинский Александр Григорьевич
доктор технических наук, директор НИЦ обработки изображений и сигналов «Сигнал» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Ведущая организация: **Институт космических исследований Российской академии наук (г. Москва)**

Защита состоится **25 сентября 2025 года в 12:00** на заседании диссертационного совета 24.2.375.01 в РГРТУ по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

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

Автореферат разослан _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.01
доктор технических наук



**Прущков Александр
Викторович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность темы. Аэрокосмические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используются во многих сферах человеческой деятельности. Они осуществляют мониторинг земной поверхности с целью оперативного получения объективной информации о геометрических, радиометрических, спектральных и других характеристиках наблюдаемых объектов.

Среди многообразия систем ДЗЗ важное место отводится системам гиперспектральной съемки Земли. Они позволяют в заданном спектральном диапазоне одновременно сформировать сто и более изображений в очень узких соприкасающихся поддиапазонах длин волн, так называемый гиперкуб $B = (B_k(m, n); k = \overline{1, K}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N})$. Здесь B – вектор K двумерных изображений $B_k(m, n)$; (m, n) – регистрационные координаты раstra изображений, однозначно связанные с точками земной поверхности; k – номер спектрального канала (поддиапазона), определяемый длиной волны λ_k ; $B_k(m, n)$ – яркость точки k -го изображения, формируемая гиперспектрометром в некоторой общепринятой системе измерений.

В отличие от систем панхроматической и спектральной съемки с ограниченным числом спектральных каналов, гиперспектральное изображение B каждой точке (m, n) ставит в соответствие спектральную характеристику в виде вектора $B = (B_k, k = \overline{1, K})$, которая определяет физико-химические свойства наблюдаемого объекта. Это создает новые возможности по пространственно-частотному анализу наблюдаемой сцены и эффективному решению трудно формализуемой задачи идентификации объектов Земли.

Вместе с этим гиперспектральный принцип съемки основан на расщеплении лучистой энергии, поступающей на входной зрачок гиперспектральной аппаратуры, на K потоков, из которых формируются K изображений $B_k, k = \overline{1, K}$. В результате оптоэлектронной регистрации этих изображений уровень полезного сигнала многократно уменьшается, а уровень шума в каждом k -м спектральном канале остается практически без изменения. То есть новые знания о спектральной характеристике точек наблюдаемого объекта даются ценой ухудшения радиометрического качества изображений $B_k, k = \overline{1, K}$. Это одна из принципиальных особенностей, требующая ее учета при построении алгоритмов идентификации объектов по гиперспектральным данным.

Другой характерной особенностью рассматриваемой задачи является необходимость получения глубоких знаний по спектральным характеристикам звеньев, образующих сквозной информационный тракт (СИТ) систем гиперспектральной съемки Земли. Эти звенья можно разделить на две категории: те, которые достаточно точно описаны в виде аналитических моделей, и те, которые представлены лишь приближенными моделями с высокой степенью неопределенности. В этой ситуации «напрашивается» аналитико-нейросетевой подход к созданию алгоритмов идентификации объектов Земли по данным ги-

перспектральной съемки, в которых неопределенность в знаниях о звеньях СИТ разрешается с использованием обучаемых искусственных нейронных сетей.

В диссертации представлены новые научно обоснованные технические решения в виде алгоритмов аналитико-нейросетевой идентификации объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Предложенные алгоритмы нацелены на повышение точности, надежности и уровня автоматизации технологий идентификации объектов земной поверхности. Они востребованы во многих важных народно-хозяйственных и военных приложениях.

Степень разработанности темы. В настоящее время в России, и особенно за рубежом, активно ведутся работы по созданию и внедрению космической гиперспектральной аппаратуры (ГСА). Наибольшим опытом в этом направлении обладают США, где сегодня производятся передовые образцы ГСА. Например, с 2023 г. функционирует группировка космических аппаратов (КА) «GHOST», обеспечивающая гиперспектральную съемку с пространственным разрешением 8 м, что является прорывным показателем для ГСА. Особое внимание развитию гиперспектральных технологий уделяют страны Европы, Индия, Китай. Среди действующих и планируемых к запуску систем космической гиперспектральной съемки следует выделить: КА «PRISMA» (ГСА «НУС», Италия, 2019); КА «EnMAP» (ГСА «HIS», Германия, 2022); КА «FLEX» (ГСА «FLORIS», Европейское космическое агентство, 2026); КА «IMS-2» (ГСА «HysIS», Индия, 2019); КА «Gaofen-5» (ГСА «AHSI», Китай, 2018) и др.

Россия в части работ по созданию космических гиперспектральных систем ДЗЗ в настоящее время имеет более скромные результаты. Тем не менее, следует отметить две разработки в данной области. Первый отечественный образец ГСА космического базирования выведен на орбиту в 2012 г. в составе малого космического аппарата МКА-ФКИ «Зонд-ПП» (головной разработчик – НПО им. С.А. Лавочкина, в кооперации с НПО «Лептон», Центром Келдыша, ЦНИИмаш, РГРТУ и др.). В 2013-2025 годах осуществлены запуски пяти космических аппаратов системы «Ресурс-П» с ГСА (головной разработчик системы – Ракетно-космический центр «Прогресс», разработчик ГСА – Красногорский завод им. С.А.Зверева) с привлечением широкой кооперации: Корпорация «Российские космические системы» и входящий в нее Научный центр оперативного мониторинга Земли; НИИ точных приборов; НПП «ОПТЭКС», «Госцентр «Природа», РГРТУ и др. Результаты настоящей диссертации базируются главным образом на исследовании технологий обработки данных от ГСА космической системы «Ресурс-П».

Главное предназначение систем гиперспектральной съемки Земли – это создание эффективных технологий идентификации объектов наблюдаемой сцены на основе дистанционных измерений их спектральных характеристик. Этой проблеме подчинены все смежные вопросы наземной обработки гиперспектральных изображений (ГСИ). Основной трудностью при измерении коэффициентов спектрального отражения объектов (КСО) является случайная изменчивость свойств атмосферы при прохождении через нее падающего от Солнца и отраженного от Земли излучения, поступающего на вход ГСА.

В решении вопросов обработки ГСИ с ориентацией на самые различные практические приложения в России активно занимаются отмеченные головные разработчики космических систем гиперспектральной съемки. При этом важную роль играют ряд ВУЗов и научных организаций: МГУ им. М.В. Ломоносова, МФТИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГРТУ им. В.Ф. Уткина, ВКА им. А.Ф. Можайского, НИЦ «Планета», Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Институт космических исследований РАН, Институт систем обработки изображений РАН, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самарский государственный технический университет и др.

Целью диссертации является разработка новых эффективных алгоритмов аналитико-нейросетевой идентификации искусственных и природных объектов по данным космической гиперспектральной съемки Земли.

Задачи. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач:

- анализ передовых отечественных и зарубежных систем космической гиперспектральной съемки и современных методов обработки гиперспектральной информации;
- разработка аналитико-нейросетевой модели идентификации объектов земной поверхности по данным космической гиперспектральной съемки Земли на основе использования знаний о видеотракте подобных систем при нейросетевой обработке;
- разработка кусочно-линейной модели спектральной передаточной характеристики видеотракта систем гиперспектральной съемки Земли;
- разработка алгоритма комплексирования информации от систем моделирования процесса переноса солнечного излучения с данными от реальных систем гиперспектральной съемки;
- разработка алгоритма радиометрической калибровки ГСА, основанного на априорных знаниях о коэффициентах спектральной передачи звеньев сквозного видеоинформационного тракта;
- разработка алгоритма выделения границ природных объектов по гиперспектральным снимкам на основе их структурно-частотного анализа;
- программная реализация разработанных алгоритмов и оценка эффективности их работы на реальных данных от систем космической гиперспектральной съемки Земли.

Научная новизна работы заключается в комплексном использовании аналитических и нейросетевых моделей для решения важной научной задачи идентификации объектов на гиперспектральных космических снимках. В работе представлены новые эффективные алгоритмы процесса идентификации объектов, основанные на совместном использовании знаний о видеотракте систем гиперспектральной съемки и нейросетевых технологий.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что в ней разработаны новые алгоритмы аналитико-нейросетевой идентификации объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки и на их основе созданы программные средства, получившие эффективное внедрение.

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

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в части:

- пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;
- пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;
- пункта 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитико-нейросетевая модель идентификации объектов земной поверхности по данным систем космической гиперспектральной съемки, основанная на использовании знаний о характеристиках видеотракта этих систем при нейросетевой обработке и позволяющая повысить точность идентификации объектов на 20-30% (для выбранного класса задач и объектов).

2. Кусочно-линейная модель спектральной передаточной характеристики видеотракта систем гиперспектральной съемки Земли, позволяющая в общем случае некорректно поставленную задачу оценки коэффициентов спектрального отражения наблюдаемых объектов перевести в разряд корректно решаемых.

3. Алгоритм комплексирования информации от систем гиперспектральной съемки Земли с данными от систем моделирования видеотракта и сети опорных полигонов, позволяющий сделать обоснованный выбор единой дискретной сетки частот и обеспечить наилучшее спектральное разрешение гиперкуба при аналитико-нейросетевой идентификации наблюдаемых объектов.

4. Алгоритм выделения границ объектов по гиперспектральным снимкам, основанный на их структурно-частотном анализе и позволяющий на 30% повысить вероятность правильной идентификации границ по сравнению с традиционными операторами структурного анализа.

5. Алгоритм радиометрической калибровки гиперспектрометра, основанный на априорных знаниях о коэффициентах спектральной передачи звеньев сквозного видеоинформационного тракта и позволяющий в процессе его летной эксплуатации снизить СКО измерений гиперкуба с 8 до 3%.

Первое Положение для диссертации является системообразующим, все последующие – его конструктивными элементами, имеющими важное самостоятельное научно-прикладное значение.

Степень достоверности и апробация. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата, широкими исследованиями предложенных алгоритмов на статистически представительных данных от зарубежных систем гиперспектраль-

ной съемки и от отечественной системы «Ресурс-П», а также сравнением результатов с альтернативными подходами и лучшими аналогами.

По основным положениям и результатам исследований сделано 16 докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях. На международных конференциях: «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (Москва, 2022, 2023); «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2023). На всероссийских конференциях: «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024); «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2019).

Внедрение. Диссертационные исследования выполнены в рамках темы «Ресурс-П», определенной Федеральной космической программой на 2016-2025 годы (ОКР 7-17 и ОКР 5-24). Разработанные программные средства получили эффективное внедрение, что подтверждается Актами от Ракетно-космического центра «Прогресс» и Корпорации «Российские космические системы».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 работ: 9 статей (6 в изданиях по списку ВАК), 16 тезисов докладов на международных и всероссийских научно-технических конференциях, получены 4 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Ее объем составляет 146 с., в том числе 108 с. – основное содержание, 14 с. – рисунки и таблицы, 17 с. – список литературы, 7 с. – приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. Анализ становления и развития космических систем гиперспектральной съемки Земли

Изучены зарубежные и российские системы гиперспектральной съемки Земли и методы наземной обработки поступающей от них информации. Анализ показал, что Россия отстает в этой важной области от ряда зарубежных стран, что требует активизации научных исследований и опытно-конструкторских разработок. В связи с этим выделены следующие задачи.

Во-первых. Необходимо научно обосновать комплексный подход к идентификации объектов земной поверхности по данным от систем гиперспектральной съемки. Основой такого подхода должно стать получение глубоких знаний о сквозном информационном тракте (СИТ) подобных систем, рациональное объединение точных знаний по отдельным звеньям СИТ и приближенных знаний по другим звеньям, а также использование нейросетевых технологий, т.е. решение следующих задач:

- разработка общей модели СИТ;
- формулировка основных прикладных задач, вытекающих из СИТ;
- программная реализация СИТ и ее исследование на реальных данных от систем гиперспектральной съемки Земли;

- подтверждение эффективности комплексного подхода для заданного класса объектов и решаемых задач.

Во-вторых. Комплексный подход должен быть нацелен на повышение точности решения центральной задачи – оценки коэффициентов спектрального отражения (КСО) объектов при их гиперспектральном наблюдении. По результатам съемки доступны данные лишь для двух информационных сечений СИТ: излучение Солнца на верхней границе атмосферы и данные измерений ГСА в виде гиперкуба. В этом случае КСО наблюдаемого объекта определяется как отношение мощности отраженного от него излучения к падающему. Падающее излучение рассчитывается на основе прямого соответствия, а отраженное с использованием обратного соответствия. Стоит задача корректного перевода обратного соответствия в прямое.

В-третьих. Важной задачей является комплексное использование аналитических описаний гиперспектральных данных в отдельных звеньях СИТ и модельных (приближенных) представлений данных в других звеньях с применением, например модели «6S». Есть еще важный источник данных – это опорные полигоны, например сеть «RadCalNet». Необходимо решить задачу использования данных от опорных полигонов для калибровки гиперспектрометра, разработать алгоритмы представления данных от гиперспектрометра, системы «6S» и сети «RadCalNet» в едином формате, обеспечив наилучшую точность гиперспектральных измерений.

В-четвертых. Необходимо решить задачу радиометрической калибровки гиперспектрометра в ходе его летной эксплуатации, для чего нужна измерительная информация по всем звеньям СИТ. Особое внимание необходимо уделить данным ГСА, полученным в результате съемки опорных радиометрических полигонов, выступающих в роли эталонных источников.

В-пятых. Необходимо создать алгоритмы обработки гиперспектральных данных с использованием структурно-частотных мер близости соседних элементов гиперкуба. Такой подход позволяет на качественно новом уровне при использовании нейронных сетей решить ряд важных задач, остро востребованных во многих приложениях.

Все эти пять задач определяют **Положения 1-5**, выносимые на защиту, т.е. основное содержание работы.

Глава 2. Аналитико-нейросетевой подход к идентификации объектов Земли по данным гиперспектральной съемки

Сформулированы концептуальные соображения по организации аналитико-нейросетевого подхода к идентификации объектов Земли по данным гиперспектральной съемки (**Положение 1**):

- создание новых алгоритмов, основанных на структурно-частотном анализе гиперспектральных изображений с учетом особенностей процесса их формирования;

- оценка спектральных передаточных характеристик звеньев СИТ с использованием нейросетевой обработки гиперспектральных изображений;

- использование точных аналитических описаний отдельных звеньев СИТ и приближенных описаний других звеньев для аналитико-нейросетевой идентификации объектов земной поверхности;

- интеграция знаний о реальных системах гиперспектральной съемки Земли, систем моделирования этого процесса и сетей наземных опорных полигонов.

СИТ систем получения и обработки гиперспектральных данных можно представить в виде схемы:

$$S_B^{\Pi} \xrightarrow{\gamma_A} S_H^{\Pi} \xrightarrow{\gamma_3} S_H^O \xrightarrow{\gamma_A} S_B^O \xrightarrow{\gamma_{KA}} B, \quad (1)$$

где S_B^{Π} , S_H^{Π} , S_H^O , S_B^O – потоки излучения от Солнца, падающие на Землю (Π) и отраженные от нее (O) на верхней (B) и нижней (H) границах атмосферы; $\gamma_A = S_H^{\Pi}/S_B^{\Pi}$, $\gamma_3 = S_H^O/S_H^{\Pi}$, $\gamma_{KA} = B/S_B^O$ – одномерные функции от $\lambda_k, k = \overline{1, K}$ (дискретных отсчетов средних значений частот в K поддиапазонах ГСА). Из (1) следует коэффициент спектральной передачи всего сквозного информационного тракта: $\gamma_{СИТ} = B/S_B^{\Pi} = \alpha \cdot \gamma_A^2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_{KA}$, где α – коэффициент, определяемый углом падения излучения от Солнца на объект и углом отражения в направлении КА.

Разработана кусочно-линейная модель видеотракта систем гиперспектрального наблюдения Земли (**Положение 2**), позволяющая перевести в общем случае не корректно поставленную задачу оценки КСО в разряд корректно решаемых. Основное назначение модели заключается в оценке по дискретной сетке частот значений СПЭЯ для произвольной длины волны. Особенно это касается зон атмосферных искажений. В данном случае эти зоны заменяются линейными приближениями по ближайшим слева и справа неискаженным атмосферой отсчетам. Для каждого k -го спектрального поддиапазона определяются коэффициенты линейного отображения

$$a_k = \frac{S_{k+1} - S_k}{\lambda_{k+1} - \lambda_k}, \quad b_k = \frac{S_k \lambda_{k+1} - S_{k+1} \lambda_k}{\lambda_{k+1} - \lambda_k}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (2)$$

Поскольку по техническим соображениям $(\lambda_{k+1} - \lambda_k) > 0$, то отображение $\lambda \rightarrow S$ однозначно определяется для всех значений из диапазонов измерений λ и S . Иная ситуация наблюдается при обратном отображении $S \rightarrow \lambda$, когда для k -го частотного поддиапазона $[\lambda_k, \lambda_{k+1}]$ значения $[S_k, S_{k+1}]$ обратного линейного преобразования a_k^{-1} , b_k^{-1} , определяются как

$$a_k^{-1} = \frac{\lambda_{k+1} - \lambda_k}{S_{k+1} - S_k}, \quad b_k^{-1} = - \frac{S_k \lambda_{k+1} - S_{k+1} \lambda_k}{S_{k+1} - S_k}, \quad (3)$$

т.е. возникает неоднозначность отображения $\lambda \rightarrow S$ при $S_k = S_{k+1}$. Поэтому при обратном отображении $S \rightarrow \lambda$ возникает вопрос, как реагировать на ситуацию при $|S_{k+1} - S_k| + \varepsilon \leq 0$, где ε – допустимо малая положительная величина. Разработан алгоритм разрешения данной неопределенности.

Шаг 1. В каждом k -м поддиапазоне $[\lambda_k, \lambda_{k+1}]$, $k = \overline{1, K}$, проверяется усло-

вие $|S_{k+1} - S_k| \leq \varepsilon$. Если это условие не выполняется, то процесс идет по «стандартному» пути, по формуле (3), в противном случае следует переход к шагу 2.

Шаг 2. При $|S_{k+1} - S_k| \leq \varepsilon$ фиксируется, что S_k и S_{k+1} близки друг к другу. В этом случае частотный поддиапазон разбивается на N равных участков (субподдиапазонов) с шириной $(\lambda_{k+1} - \lambda_k)/N$, т.е. формируется новая более частая сетка частот $\lambda_n = \lambda_k + (\lambda_{k+1} - \lambda_k)n/N$, где $n = \overline{0, N}$ – номер отсчета. При $n = 0$: $\lambda_n = \lambda_k$; при $n = N$: $\lambda_n = \lambda_{k+1}$. Для каждого отсчета λ_n формируется $S_n \in [S_k, S_{k+1}]$ по формуле прямого соответствия (2), в которой вместо (a_k, b_k) вычисляются (a_n, b_n) , а вместо (S_k, S_{k+1}) и $(\lambda_k, \lambda_{k+1})$ используются (S_n, S_{n+1}) и $(\lambda_n, \lambda_{n+1})$. В результате в более частой решетке формируется и прямое соответствие $\lambda_n \rightarrow S_n$ и обратное $S_n \rightarrow \lambda_n$, $n = \overline{0, N}$. При этом важно, что сохраняются базовые (опорные) соответствия: $\lambda_k \rightarrow S_k$, $S_k \rightarrow \lambda_k$ при $n = 0$ и $n = N$. По существу при $|S_{k+1} - S_k| \leq \varepsilon$ используется кусочно-постоянная модель СИТ, исключая некорректные ситуации, характерные для кусочно-линейной модели, когда в (3) знаменатель $S_{k+1} - S_k$ близок или равен нулю.

Разработан алгоритм комплексирования информации от систем гиперспектральной съемки Земли с данными от систем моделирования этого процесса и опорных полигонов (**Положение 3**). Рассмотрены два варианта решения этой задачи.

Вариант 1. Отсчеты $S_i, i = \overline{1, I}$, $\Delta_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i = \Delta = Const$, формируемые ОП, не изменяются, а по ним определяются интерполированные отсчеты в нерегулярной сетке частот ГСА:

$$\tilde{S}_k = S_i(1 - \alpha_i) + S_{i+1} \cdot \alpha_i, \quad (4)$$

где $\alpha_i = (\lambda_k - \lambda_i)/\Delta$ – коэффициент, равный тангенсу угла наклона линии, проходящей через точки (λ_i, S_i) и (λ_{i+1}, S_{i+1}) . При $\lambda_k = \lambda_i$: $\alpha_i = 0$ и $\tilde{S}_k = S_i$. При $\lambda_k = \lambda_{i+1}$: $\alpha_i = 1$ и $\tilde{S}_k = S_{i+1}$.

Вариант 2. Отсчеты $B_k, k = \overline{1, K}$, $\Delta_k = \lambda_{k+1} - \lambda_k \neq Const$, формируемые ГСА, не изменяются и по ним находятся интерполированные отсчеты $\tilde{B}_i, i = \overline{1, I}$, в регулярной сетке частот ОП. В данном случае:

$$\tilde{B}_i = B_k(1 - \alpha_k) + B_{k+1} \cdot \alpha_k, \quad (5)$$

где $\alpha_k = (\lambda_i - \lambda_k)/\Delta_k$. При $\lambda_i = \lambda_k$: $\alpha_k = 0$ и $\tilde{B}_i = B_k$. При $\lambda_i = \lambda_{k+1}$: $\alpha_k = 1$ и $\tilde{B}_i = B_{k+1}$.

Выполнена оценка точности каждого из вариантов по критерию $\eta = \eta_1/\eta_2$, где: $\eta_1 = D(\tilde{S})/D(S)$, $\eta_2 = D(\tilde{B})/D(B)$ – отношения дисперсий исходных (B, S) и интерполированных (\tilde{B}, \tilde{S}) последовательностей. Установлено, что

$$\eta_1 = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \frac{K(S_i, S_{i+1})}{D(S)}, \quad \eta_2 = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{D(\varepsilon)}{D(B)} \right) + \frac{1}{3} \frac{K(B_k, B_{k+1})}{D(B)}. \quad (6)$$

где $K(S_i, S_{i+1})$, $K(B_k, B_{k+1})$ – корреляционные моменты. На реальных данных от системы «Ресурс-П» установлено, что точность комплексирования по первому варианту на **12-16%** выше, чем по второму.

Глава 3. Алгоритмы нейросетевой идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки Земли

В этой главе выдвигаются и обосновываются **Положения 4 и 5**, выносимые на защиту (стр. 4). Обоснована целесообразность использования сверточных нейронных сетей (СНС) для реализации аналитико-нейросетевого подхода к идентификации объектов Земли по данным гиперспектральной съемки. Выполнен анализ вариантов структурной организации СНС при подаче на их вход структурной и структурно-частотной информации об объектах наблюдаемой сцены. С использованием метода главных компонент (МГК) исследован вопрос сокращения избыточности гиперспектральных данных. Обоснована целесообразность вычисления единого базиса МГК по всей репрезентативной выборке данных. С использованием реальной гиперспектральной информации от системы «Ресурс-П» и авиационного гиперспектрометра «AVIRIS» установлено, что для нейросетевой идентификации объектов достаточно пяти главных компонент. Показано, что при использовании данных о спектрах наблюдаемых объектов на **10-20%** и более повышается точность их идентификации по сравнению с применением только структурной информации.

Разработан алгоритм выделения границ объектов на гиперспектральных снимках, основанный на структурно-частотном анализе мер близости соседних точек гиперкуба, позволяющий повысить точность решения этой задачи (**Положение 4**). Для гиперкуба $B = (B_k, k = \overline{1, K})$ две ближайшие точки B_{1k} и B_{2k} , $k = \overline{1, K}$, определяются двумя K -мерными векторами $B_1 = (B_{1k}, k = \overline{1, K})$ и $B_2 = (B_{2k}, k = \overline{1, K})$. Для оценки степени близости этих точек использованы среднеквадратическая, корреляционная и спектрально-угловая мера, которые определяются соответственно выражениями

$$\Delta_{12} = \sqrt{\overline{B_1^2} - 2\overline{B_1 \cdot B_2} + \overline{B_2^2}}, \quad \rho_{12} = \frac{\overline{B_1 \cdot B_2} - \overline{B_1} \cdot \overline{B_2}}{\sqrt{\overline{D_1} \cdot \overline{D_2}}}, \quad \alpha_{12} = \arccos \frac{\overline{B_1 \cdot B_2}}{\sqrt{\overline{B_1^2} \cdot \overline{B_2^2}}}, \quad (7)$$

где черта над переменными означает их усреднение по $k = \overline{1, K}$; D_1 и D_2 – оценки дисперсий для последовательностей B_1 и B_2 . Здесь и далее под любой операцией с двумя векторами B_1 и B_2 будем понимать ее поэлементное выполнение (умножение, квадрат и др.) при получении результирующего вектора. В (7) детектором сходства B_1 и B_2 является степень их корреляции, определяемая членом $\overline{B_1 \cdot B_2}$. Другие переменные в этих формулах используются для нормировки конечных результатов сравнения. Покажем, например, что меры Δ_{12} и ρ_{12} аналитически взаимно связаны при вполне определенном преобразовании одной из последовательностей B_1 или B_2 .

Мера ρ_{12} инвариантна к любым линейным преобразованиям B_1 и B_2 , т.е. дает при этом одну и ту же численную оценку ρ_{12} . Мера Δ_{12} таким свойством не обладает. Найдем коэффициенты линейных преобразований a и d , которые однозначно аналитически связывают Δ_{12} и ρ_{12} . Потребуем, например, чтобы линейное преобразование $B_{2k} \rightarrow B_{2k}^* = a \cdot B_{2k} + d$, $k = \overline{1, K}$, обеспечивало бы равенство средних $\overline{B_2^*} = \overline{B_1}$ и СКО $\sigma_2^* = \sigma_1$.

Коэффициенты a и d можно найти из системы $a\overline{B_2} + d = \overline{B_1}$, $a\sigma_2 = \sigma_1$. Они равны $a = \sigma_1/\sigma_2$, $d = \overline{B_1} - \sigma_1/\sigma_2 \cdot \overline{B_2}$. В результате получим $B_{2k}^* = \sigma_1/\sigma_2 (B_{2k} - \overline{B_2})$, $\Delta_{12}^* = \sigma_1 \sqrt{2(1 - \rho_{12})}$ или обратное соотношение $\rho_{12} = 2 - (\Delta_{12}^*/\sigma_1)^2$, т.е. взаимно однозначную аналитическую связь. Аналогичный результат получим, если B_{2k} принять за базовую последовательность, а линейное преобразование выполнить для B_{1k} : $\Delta_{12}^* = \sigma_2 \sqrt{2(1 - \rho_{12})}$; $\rho_{12} = 2 - (\Delta_{12}^*/\sigma_2)^2$. Отметим, что мера ρ_{12} не позволяет выполнить численную оценку близости последовательностей B_{1k} и B_{2k} , $k = \overline{1, K}$. Для меры Δ_{12} такую оценку можно получить по методу наименьших квадратов по критерию

$$R = \sum_{k=1}^K (a B_{1k} + d - B_{2k})^2 = \min : \quad (8)$$

$$R_{\min} = D_2 - \frac{K_{12}^2}{D_1} \text{ при } a = \frac{K_{12}}{D_1}, \quad d = \overline{B_2} - \frac{K_{12}}{D_1} \overline{B_1}, \text{ где } K_{12} = \overline{B_1 \cdot B_2} - \overline{B_1} \cdot \overline{B_2}.$$

Рассмотрен вопрос об искажающем действии электронного шума на показания мер (7). Например, для мер Δ_{12} и ρ_{12} получено:

$$\Delta_{12}^* = \sqrt{(\overline{B_1^*}^2 - 2\overline{B_1^*} \cdot \overline{B_2^*} + \overline{B_2^*}^2) + 2D_\varepsilon}, \quad \rho_{12}^* = \frac{\overline{B_1^*} \cdot \overline{B_2^*} - \overline{B_1^*} \cdot \overline{B_2^*}}{\sqrt{D_1 \cdot D_2 + D_\varepsilon(D_1 + D_2) + D_\varepsilon^2}}, \quad (9)$$

где B_1^* и B_2^* – последовательности данных, не подверженные искажениям шума, D_1 и D_2 – оценки дисперсий полезного сигнала в наборах B_1 , B_2 .

Предложены модифицированные меры, менее чувствительные к шуму

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_{12} &= \sqrt{\psi_1 - 2\overline{B_{1k} \cdot B_{2k}} + \psi_2}, \\ \tilde{\rho}_{12} &= \frac{1}{\sqrt{\psi_1 \cdot \psi_2}} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{1k} \cdot B_{2k} - \frac{1}{K^2} \sum_{k=1}^K B_{1k} \cdot \sum_{k=1}^K B_{2k} \right), \\ \tilde{\alpha}_{12} &= \arccos \left(\frac{\overline{B_{1k} \cdot B_{2k}}}{\sqrt{\psi_1 \cdot \psi_2}} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где ψ_1 и ψ_2 – оценки автокорреляционных функций, рассчитанные для спектральных характеристик B_{1k} и B_{2k} , которые при достаточно большом K практически не зависят от дисперсии электронного шума.

Исследован вопрос об использовании контурной информации для повышения точности идентификации объектов СНС. Для этого на вход СНС дополнительно к главным компонентам, полученным по МГК, поступала контурная информация. В среднем прирост F-меры, широко используемой для оценки качества идентификации, составил **5-10%** для выбранных классов объектов (растительность, поля, почва, дороги, застройка). На рисунке 2 представлен пример контурной обработки ГСИ: слева – с использованием структурно-частотного анализа, справа – с использованием известного детектора Собела.

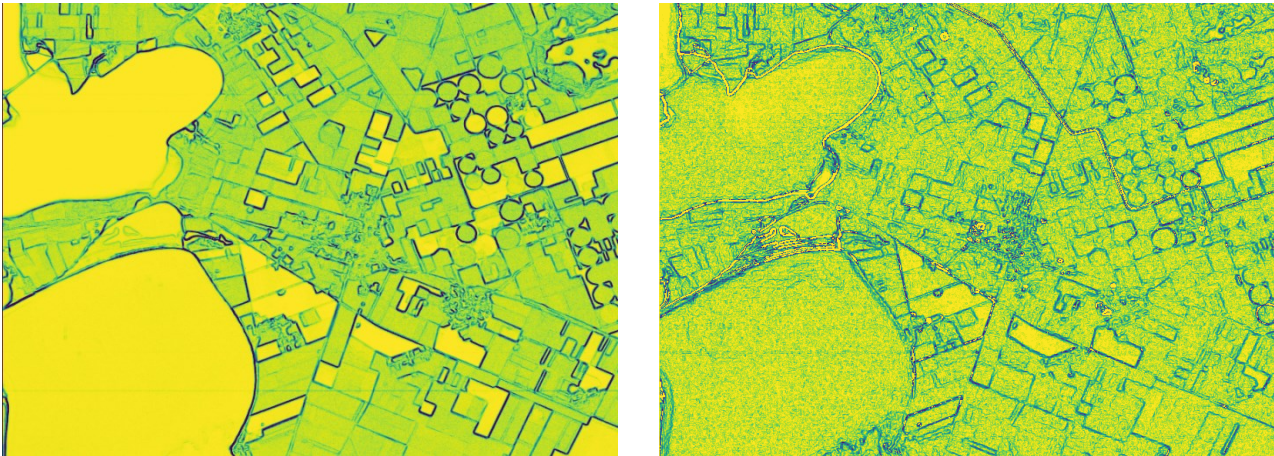


Рисунок 1 – Пример результатов выделения границ на ГСИ

Предложен алгоритм и информационная технология радиометрической калибровки гиперспектральной аппаратуры в ходе ее летной эксплуатации с использованием гиперспектральных данных съемки опорных полигонов сети «RadCalNet» и моделирующей системы «6S» (**Положение 5**). Алгоритм решения этой задачи включает следующие действия:

Шаг 1. Осуществляется сканирование опорного радиометрического полигона (ОП) гиперспектрометром. В результате формируются следующие исходные данные:

- гиперкуб ОП $B_{ОП} = (B_{ОП,k}(m,n), m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K})$ с фиксацией времени $t_{ОП,КА}$ его формирования;

- коэффициент пропускания атмосферы $\gamma_{А,ОП} = (\gamma_{А,ОП,k}, k = \overline{1, K})$ и коэффициент спектрального отражения ОП $\gamma_{ОП} = (\gamma_{ОП,k}, k = \overline{1, K})$ на моменты времени $t_{ОП}$, ближайшие к $t_{ОП,КА}$ (по данным сети «RadCalNet»).

Шаг 2. Выполняется настройка моделирующей системы «6S» на данные от ОП, т.е. ей задается $\gamma_{А,ОП}$, $\gamma_{ОП}$ и проверяется адекватность данных от систем «6S» и «RadCalNet» путем сопоставления от них информации на входном зрачке ГСА.

Шаг 3. Данные съемки ОП, т.е. гиперкуб $B_{ОП}, S_{B,6S}^O$ и $S_{B,ОП}^O$, очищаются от атмосферных искажений, т.е. формируются $B_{ОП}^* = B_{ОП} / \gamma_{А,ОП}$, $S_{B,6S}^{O*} = S_{B,6S}^O / \gamma_{А,ОП}$, $S_{B,ОП}^{O*} = S_{B,ОП}^O / \gamma_{А,ОП}$, в результате удаления информации из

спектральных зон с повышенным искажающим действием атмосферы и ее замены экстраполированными данными.

Шаг 4. Радиометрическая калибровка ГСА. Для каждого спектрального канала ГСА определяется пара коэффициентов a_k , b_k , $k = \overline{1, K}$, по которым формируется откалиброванный гиперкуб $B_{оп}^{**} = (B_{оп,k}^{**}, k = \overline{1, K})$, где $B_{оп,k}^{**} = a_k \cdot B_{оп,k}^* + b_k$, $k = \overline{1, K}$. Коэффициенты темнового сигнала b_k , $k = \overline{1, K}$, оцениваются в режиме полного перекрытия излучения на входном зрачке ГСА. Мультикативные коэффициенты определяются как $a_k \cdot (B_{оп,k}^* - b_k) = S_{в,оп,k}^*$, т.е. $a_k = S_{в,оп,k}^* / (B_{оп,k}^* - b_k)$, $k = \overline{1, K}$.

Рассмотрены вопросы по использованию индексных изображений в качестве дополнительной информации для СНС о характерных свойствах спектров типовых объектов земной поверхности с целью повышения точности и надежности процесса их идентификации. Зафиксирован прирост точности идентификации объектов: **9%** для водной поверхности; **26%** для растительности и **13%** для почвы. В тоже время, для искусственных объектов интеграция индексных изображений не дает существенного прироста точности. Это обусловлено низкой информативностью видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра для выделения таких объектов. Большинство искусственных объектов, в отличие от природных, обладают четко выраженной формой и границами. Поэтому при их идентификации оказывается значительно более ценной контурная информация, полученная в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне.

На рисунке 3 представлен пример индексного изображения для ГСИ от КА «Ресурс-П», сформированного по узкополосному индексу NDVI.

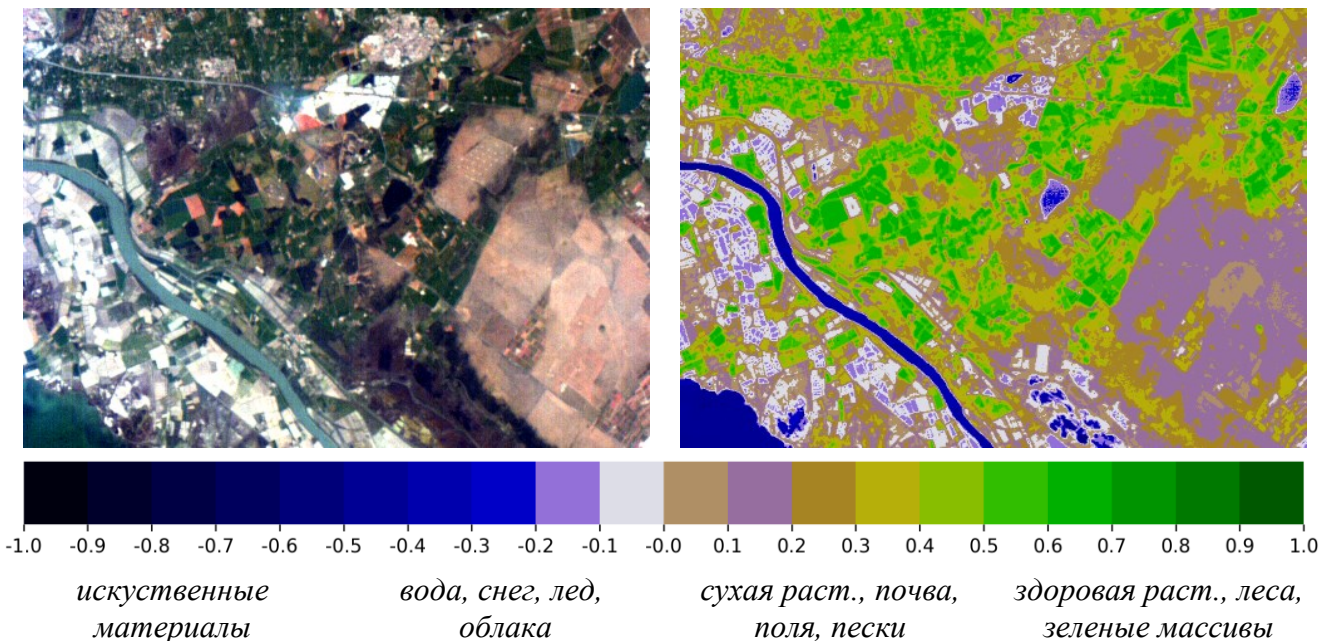


Рисунок 2 – NDVI (справа) для ГСИ (слева) от КА «Ресурс-П»

Глава 4. Экспериментальные исследования по подтверждению эффективности положений, выносимых на защиту

В главе 4 ставится задача получить достоверные численные оценки эффективности выдвинутых на защиту Положений на основе статистически представительной информации, привлекая для этого данные от российской космической системы «Ресурс-П», информационные ресурсы моделирующей системы «6S» и результаты многолетних съемок опорных полигонов системы «Rad-CalNet». **Положение 1** является системообразующим для диссертации, поэтому оценка его эффективности рассматривается в конце главы.

Положение 2. Выполнен эксперимент по подтверждению корректности кусочно-линейной модели СИТ. Для этого на основе информационных ресурсов системы 6S выполнен синтез гиперспектральных данных для широкого диапазона параметров съемки: КСО наблюдаемых объектов (растительность, почва, песок, вода) по данным базы USGS; профиль атмосферы (лето, зима, различные широты); тип аэрозолей (континентальный, пустынный, морской, городской); оптическая толщина аэрозоля (от 0.01 до 1); зенитный угол Солнца (от 10 до 89 градусов).

Для инициализации модели 6S использовался случайный набор параметров. Всего для эксперимента сгенерировано **500** спектров. Для каждого спектра сформирован полный набор гиперспектральной информации: S_B^{Π} , S_H^{Π} , S_H^O , S_B^O (см. схему (1)). Выполнена оценка степени линейной связи между S_B^{Π} и S_H^{Π} , а также S_H^O и S_B^O с использованием двух мер близости: с помощью коэффициента корреляции $\rho^{\Pi}(S_B^{\Pi}, S_H^{\Pi})$, $\rho^O(S_H^O, S_B^O)$, который инвариантен к любым линейным преобразованиям анализируемых данных, и с помощью среднеквадратической меры $\Delta^{\Pi}(S_B^{\Pi}, S_H^{\Pi})$, $\Delta^O(S_H^O, S_B^O)$. В данном эксперименте Δ определялась по методу наименьших квадратов как

$$\Delta^{\Pi} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k (S_{B,k}^{\Pi} - a^{\Pi} \cdot S_{H,k}^{\Pi} - b^{\Pi})^2} = \min, \quad \Delta^O = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k (S_{H,k}^O - a^O \cdot S_{B,k}^O - b^O)^2} = \min, \text{ где}$$

a^{Π} , b^{Π} и a^O , b^O – коэффициенты линейного преобразования для наборов данных $S_{H,k}^{\Pi}$ и $S_{B,k}^O$, $k = \overline{1, K}$, при которых $\Delta^{\Pi} = \min$ и $\Delta^O = \min$. Средние значения

$$\begin{aligned} & \text{по выборке из 500 спектров составили: прямое отображение } S_B^{\Pi} \xrightarrow{\gamma_A^{\Pi}} S_H^{\Pi} : \\ & \overline{\rho^{\Pi}(S_B^{\Pi}, S_H^{\Pi})} = \mathbf{0.94}; \quad \overline{\Delta^{\Pi}(S_B^{\Pi}, S_H^{\Pi})} = \mathbf{0.05}; \quad \text{прямое отображение } S_H^O \xrightarrow{\gamma_A^O} S_B^O : \\ & \overline{\rho^O(S_H^O, S_B^O)} = \mathbf{0.99}; \quad \overline{\Delta^O(S_H^O, S_B^O)} = \mathbf{0.01}; \quad \text{обратное отображение } S_B^O \xrightarrow{\gamma_A^O} S_H^O : \\ & \overline{\rho^O(S_B^O, S_H^O)} = \mathbf{0.99}; \quad \overline{\Delta^O(S_B^O, S_H^O)} = \mathbf{0.01}. \end{aligned}$$

Полученные оценки свидетельствуют о практически линейном характере коэффициента пропускания атмосферы вне спектральных зон газового поглощения. Высокая степень совпадения оценок для прямого и обратного преобразований подтверждает корректность использования кусочно-линейного при-

ближения для описания процесса передачи излучения через атмосферу, как в прямом, так и в обратном направлении.

Положение 3. Выполнен анализ эффективности двух вариантов комплексирования натурной («Ресурс-П»), опорной («RadCalNet») и модельной («6S») информации. На основе многократного сканирования опорных полигонов сети «RadCalNet» («Railroad Valley», «La Crau», «Gobabeb» и «Baotou») гиперспектральной аппаратурой космического аппарата «Ресурс-П» сформированы следующие данные:

- последовательности S – исходная, сформированная по данным от опорных полигонов в регулярной шкале длин волн $\lambda \in [400, 1000]$ нм, $\Delta\lambda = Const = 10$ нм, и \tilde{S} – интерполированная в квазирегулярную сетку частот ГСА;

- последовательности B – исходная от ГСА КА «Ресурс-П», полученная в спектральном диапазоне $\lambda \in [400, 1000]$ нм с переменным значением $\Delta\lambda \neq Const$, и \tilde{B} – интерполированная в регулярную сетку частот опорного полигона.

Всего для анализа точности двух вариантов комплексирования сформировано 30 пар последовательностей S и B , для которых получены оценки $\hat{D}(S)$, $\hat{K}(S_i, S_{i+1})$, η_1 , $\hat{D}(B)$, $\hat{K}(B_k, B_{k+1})$, $\hat{D}(\varepsilon)$, η_2 и η .

Усредненные значения составили $\overline{\eta_1} = \mathbf{0.89}$, $\Delta\eta_1 = \mathbf{0.008}$, $\overline{\eta_2} = \mathbf{1.01}$, $\Delta\eta_2 = \mathbf{0.003}$, что свидетельствует о высокой стабильности показателей η_1 и η_2 при комплексировании реальной и опорной гиперспектральной информации. Среднее значение определяющего показателя $\overline{\eta} = \mathbf{0.88}$, а СКО $\Delta\eta = \mathbf{0.009}$ для тридцати различных сеансов наблюдений опорных полигонов сети «RadCalNet» гиперспектральной аппаратурой космического аппарата «Ресурс-П». Эти данные дали основание для принятия решения об использовании регулярной сетки длин волн $\Delta\lambda = Const = 10$ нм опорных полигонов для перевода в эту сетку измерений ГСА системы «Ресурс-П» с целью корректного комплексного использования информационных ресурсов систем «Ресурс-П», «6S» и «RadCalNet».

Положение 4. Выполнено статистическое исследование алгоритма идентификации границ объектов с использованием структурно-частотного анализа соседних точек. Предложен критерий оценки качества выделения границ с помощью различных алгоритмов. Выполнена сопоставительная оценка точности выделения границ с использованием разработанного алгоритма, основанного на структурно-частотном анализе гиперспектральных изображений, и традиционных алгоритмов, использующих «чисто» структурный анализ. Исследования проводились на данных от 10 протяженных маршрутов, снятых системой «Ресурс-П». В результате установлено, что разработанный в диссертации алгоритм обеспечивает повышение точности идентификации границ объектов на **20–30 %** по сравнению с алгоритмами Собела, Робертса и Кэнни, основанными на структурном анализе.

Положение 5. Исследована эффективность алгоритма радиометрической калибровки гиперспектрометра в ходе его летной эксплуатации, основанного на

априорных знаниях о коэффициентах спектральной передачи звеньев СИТ, использовании опорных полигонов сети «RadCalNet» и моделирующей системы «6S». Выполнены экспериментальные исследования алгоритма. Для этого сформирована выборка из 50 контрольных точек, по которым оценивалась точность процесса калибровки: 10 точек на территории опорных полигонов, и 40 точек на участках земной поверхности с растительностью. По этим данным получены оценки СКО измерений коэффициента спектрального отражения растительности: до калибровки зафиксировано СКО = 8%, а после калибровки СКО = 3%. Эти данные подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

Положение 1. Оценена эффективность аналитико-нейросетевого подхода идентификации объектов Земли по данным гиперспектральной съемки. Для этого привлечена следующая информация:

- десять гиперспектральных сцен от космической системы «Ресурс-П», снятых в различных временных, географических и атмосферных условиях;
- десять опорных масок, сформированных оператором;
- пять классов объектов (вода, густая и разреженная растительность, почва, искусственные объекты).

Выполнена оценка совокупного действия алгоритмов, разработанных в рамках **Положений 2–5**, данные по которым дополнительно вводились в качестве входной информации в сверточную нейронную сеть. Получена итоговая таблица, в которой в виде F-меры зафиксирован эффект от использования тех или иных решений в их возможных сочетаниях. Например, при совместном использовании алгоритмов калибровки, выделения границ и индексных изображений прирост F-меры составил: для растительности – более 20%; для почвы – более 25%; для застройки – более 35%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертации выполнен анализ отечественных и зарубежных систем гиперспектральной съемки и методов обработки поступающей от них информации. Определены новые актуальные направления научных исследований, отраженные в пяти выносимых на защиту **Положениях**.

1. Сформулированы концептуальные соображения аналитико-нейросетевой модели идентификации объектов: глубокий анализ СИТ, структурно-частотная обработка гиперспектральной информации, а также применение сверточных нейронных сетей.

2. Разработана кусочно-линейная модель видеотракта систем гиперспектральной съемки (**Положение 2**), позволяющая корректно поставить и решить основную задачу по оценке коэффициентов спектрального отражения объектов в условиях неизвестных параметров атмосферы.

3. Разработан алгоритм комплексирования реальных, модельных и опорных гиперспектральных данных (**Положение 3**), позволяющий сделать обоснованный выбор единой дискретной сетки длин волн.

4. Предложен алгоритм выделения границ объектов по гиперспектральным данным на основе структурно-частотных мер близости соседних точек гиперкуба (**Положение 4**).

5. Разработан алгоритм радиометрической калибровки гиперспектрометра в ходе его летной эксплуатации, основанный на априорных знаниях о коэффициентах спектральной передачи звеньев СИТ, использовании опорных полигонов сети «RadCalNet» и моделирующей системы «6S» (**Положение 5**).

6. Выполнена оценка эффективности технических решений, предложенных в диссертации, т.е. аналитико-нейросетевых алгоритмов идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки (**Положение 1**). Получена итоговая таблица, в которой в виде F-меры зафиксирован эффект от использования тех или иных решений в их возможных сочетаниях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Из 29 научных публикаций с участием соискателя, приведенных в диссертации, ниже представлены основные работы, которые наиболее полно раскрывают **Положения**, вынесенные на защиту.

Статьи в изданиях по списку ВАК

1. Еремеев В.А., Макаренков А.А. Использование сверточных нейронных сетей для идентификации структурно-однородных областей на космических снимках Земли. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 3. С. 45-48.

2. Еремеев В.А., Еремеев В.В., Макаренков А.А. Выделение границ объектов на гиперспектральных спутниковых снимках земной поверхности. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 3. С. 49-52.

3. Еремеев В.А., Макаренков А.А. Нейросетевая идентификация объектов Земли на основе данных от систем гиперспектральной съёмки и знаний об их видеоинформационном тракте. Цифровая обработка сигналов. 2024. № 1. С. 49-54.

4. Еремеев В.А., Егошкин Н.А., Макаренков А.А. Модель видеоинформационного тракта систем гиперспектральной съёмки Земли и её приложения. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 103-110.

5. Еремеев В.А. Аналитико-нейросетевой подход к идентификации объектов Земли по данным гиперспектральной съёмки. Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 25-30.

6. Еремеев В.А. Комплексирование данных космической гиперспектральной съёмки Земли с системами моделирования процесса передачи солнечного излучения на спутник. Вестник Рязанского государственного радиотехнического радиоуниверситета. 2024. № 90. С. 115-120.

Статьи в других изданиях

7. Еремеев В.А., Князьков П.А. Программный комплекс формирования индексных изображений по данным гиперспектрального зондирования Земли

из космоса. «Современные технологии в науке и образовании». Рязань: РГРТУ, 2021. Т. 6, С. 28-34.

8. Еремеев В.А., Ларионов С.М., Макаренков А.А. Классификация данных от космических аппаратов гиперспектральной съёмки Земли с применением искусственных нейронных сетей. «Современные технологии в науке и образовании». Рязань: РГРТУ, 2021. Т. 6. С. 35-38.

9. Еремеев В.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексование изображений, полученных при съёмке Земли в видимом и радиолокационном диапазонах спектра. «Современные технологии в науке и образовании». Рязань: РГРТУ, 2022. Т. 6, С. 5-10.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство № 2020619654. Программа для кластеризации гиперспектральных изображений на основе метода ближайших соседей: программа для ЭВМ / В.А. Еремеев, С.М. Ларионов, А.А. Макаренков, С.В. Антонушкина; правообладатель РГРТУ. Заявл. 08.07.2020; опубл. 20.08.2020.

11. Свидетельство № 2023613667. Программа формирования индексных изображений по данным гиперспектральной съёмки Земли: программа для ЭВМ / В.А. Еремеев; правообладатель РГРТУ. Заявл. 03.02.2023; опубл. 17.02.2023.

12. Свидетельство № 2023613668. Программа нейросетевой идентификации однородных участков на снимках земной поверхности: программа для ЭВМ / В.А. Еремеев; правообладатель РГРТУ. Заявл. 03.02.2023; опубл. 17.02.2023.

13. Свидетельство № 2023613685. Программа нейросетевой идентификации резких краёв на снимках от космических систем наблюдения Земли: программа для ЭВМ / В.А. Еремеев, П.А. Князьков; правообладатель РГРТУ. Заявл. 03.02.2023; опубл. 17.02.2023.

Еремеев Виктор Андреевич

АЛГОРИТМЫ АНАЛИТИКО-НЕЙРОСЕТЕВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.

Тираж 100 экз.

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