

Дементьев Виталий Евгеньевич

**ОБРАБОТКА МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО
НЕОДНОРОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ
СМЕШАННЫХ МОДЕЛЕЙ**

05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» на кафедре «Телекоммуникации».

Научный консультант:

Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, **Васильев Константин Константинович**.

Официальные оппоненты:

Визильтер Юрий Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»), начальник подразделения;

Горячкин Олег Валериевич, доктор технических наук, профессор, Институт систем обработки изображений РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», лаборатория интеллектуального анализа видеоданных, ведущий научный сотрудник;

Надеев Адель Фирадович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», институт радиоэлектроники и телекоммуникаций, директор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», г. Рязань.

Защита диссертации состоится 15 мая 2020 г. на заседании диссертационного совета Д 212.215.07, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: https://ssau.ru/resources/dis_protection/dementev.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.215.07,
доктор технических наук, профессор

И. В. Белоконов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В последние годы опубликовано большое количество работ, связанных с обработкой изображений и их последовательностей. Это связано с широким спектром практических приложений методов обработки изображений. Важными примерами таких приложений являются задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обработки видеоданных, анализа медицинских изображений и т.д. Несмотря на достигнутые успехи в решении этих задач, в настоящее время остается ряд значимых нерешенных проблем, препятствующих дальнейшему развитию методов машинного зрения. Среди этих проблем можно выделить вопросы построения математических моделей многомерных массивов коррелированных данных и их оптимальной и субоптимальной обработки. Эти вопросы рассматривались в весьма ограниченном числе работ. В основном, иностранные и отечественные специалисты в области обработки изображений стремятся к использованию нейронных сетей и алгоритмов обработки больших данных [Y. LeCun, V. Jain, M. Zeiler], что является перспективным направлением исследований, но не приближает к пониманию многомерных изображений и не дает возможности формирования оптимальных процедур их обработки.

Среди методов описания многомерных изображений (МИ) наиболее перспективными представляются модели изображений, заданных на последовательностях многомерных сеток [К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников, В.В. Сергеев, И.Н. Синицын, В.А. Сойфер, R. Gonzalez, J. Woods, C. Bouman]. Такое представление изображений позволяет достаточно просто производить с имеющимися моделями изображений операции как поэлементно, так и в целом. Однако построение моделей с помощью задания распределений вероятностей в общем виде достаточно сложно, поэтому используются разнообразные упрощения. Среди таких упрощений важнейшими являются марковость и однородность. Характерными примерами моделей, описывающих изображения с такими свойствами, являются каузальные авторегрессионные (АР) модели или некаузальные марковские модели. Однако в большинстве случаев подобные модели не позволяют адекватно описывать реальные многомерные сигналы, нестационарные во времени и обладающие пространственной неоднородностью.

Вариантами повышения адекватности представления многомерных изображений могут быть различные модификации гиббсовских моделей. Однако их использование связано со значительными аналитическими трудностями и проблемами идентификации параметров по реальным сигналам. Формирование таких полей зачастую требует достаточно большого количества итераций для обеспечения заданных свойств, но более значительным их недостатком являются сложности аналитического описания и, как следствие, проблемы разработки и технической реализации алгоритмов обработки последовательностей изображений больших размеров.

Поиск новых вероятностных моделей последовательностей многомерных изображений может быть продолжен в области применения смешанных

моделей. Например, в последнее время широкое применение в обработке изображений находят текстуры [В.Г. Бондур, Н.И. Аржененко, В.В. Сергеев, А.Ю. Баврина]. Их применение во многом объясняется широким диапазоном получаемых изображений, которые могут быть подобраны достаточно близко к реальным. Однако аналитические сложности делают маловероятным целостное представление реальных изображений, состоящих из большого количества текстурных фрагментов. Смешанные гауссовские модели [Siwei Lyu, P. Simoncelli] и модели на основе гауссовой связки и вейвлет-разложения [N.E. Lasmar, Y. Berthoumieu] дают весьма успешные результаты при работе с известными базами данных, однако не имеют достаточно разработанного математического аппарата для их исследования.

В целом, анализ доступной литературы показывает, что задача описания и обработки пространственно неоднородного и нестационарного во времени реального многомерного материала, характерным примером которого являются спутниковые многозональные изображения (МЗИ), в настоящее время не является решенной. В связи с этим актуальной задачей является построение и исследование математических моделей смешанных многомерных изображений (МИ) с одной стороны, близких по своим свойствам к реальным изображениям, в том числе к снимкам земной поверхности, а с другой, позволяющих выполнять синтез алгоритмов обработки МИ с приемлемыми для практических приложений вычислительными затратами. При этом вместе с разработкой новых моделей необходимо выполнить исследование их характеристик, а также оценить эффективность алгоритмов обработки имитируемых с их помощью изображений.

Актуальность диссертации также может быть подтверждена тем, что тема исследований соответствует «Концепции развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года», а также Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Проблема диссертационного исследования. В настоящее время отсутствуют методы и алгоритмы обработки МИ и их последовательностей, обеспечивающие достаточную эффективность в условиях пространственной неоднородности и мультиспектрального характера реального материала.

Объектом исследования являются многомерные изображения.

Предметом исследования являются вероятностные свойства смешанных моделей случайных полей (СП), а также построение и анализ эффективности алгоритмов обработки изображений, построенных на базе этих моделей.

Цель и задачи исследования. Основной целью диссертационной работы является повышение адекватности представления и эффективности обработки МИ за счет использования смешанных моделей СП. Для достижения названной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Исследование основных преимуществ и недостатков известных подходов к описанию МИ, их фильтрации и обнаружению аномалий различного вида, в том числе в приложении к задачам обработки данных ДЗЗ.

2. Разработка методов описания МИ и их последовательностей на основе смешанных моделей СП, включающих в себя комбинации АР, дважды стохастических (ДС) и разрывных моделей.

3. Разработка методик идентификации параметров смешанных моделей СП на основе реальных МИ и их последовательностей.

4. Синтез и анализ алгоритмов фильтрации и сегментации пространственно неоднородных МИ с помощью методов нелинейного рекуррентного оценивания.

5. Разработка алгоритмов обнаружения объектов на фоне МИ и сравнительный анализ известных и синтезируемых алгоритмов при обработке реальных спутниковых МЗИ.

6. Исследование возможностей адаптации алгоритмов обработки многомерных неоднородных МЗИ на основе псевдоградиентных (ПГ) численных методов.

7. Исследование возможности применения найденных методов для решения практических задач, связанных с обработкой МИ.

8. Разработка пакета программ для реализации основных алгоритмов формирования и обработки последовательностей изображений на основе предложенных моделей.

Методы исследований основаны на применении теории вероятностей, математической статистики и математического моделирования. При этом используются средства современной информатики и вычислительной техники, включая язык программирования MATLAB и среду программирования Visual Studio, а также программные средства работы с графическими изображениями.

Научная новизна результатов исследования:

1. Предложены методы формирования изображений на многомерных сетках с помощью смешанных моделей СП и получены аналитические выражения для вероятностных характеристик таких СП при использовании ДС моделей на базе АР с кратными корнями характеристических уравнений.

2. Разработан численный метод идентификации параметров смешанных моделей МИ на базе процедур ПГ оценивания, обеспечивающий требуемую в практических приложениях точность оценивания.

3. Синтезированы и исследованы методы фильтрации временных последовательностей пространственно неоднородных СП, наблюдаемых на фоне белого шума, обеспечивающие выигрыш до трех раз по величине дисперсии ошибки фильтрации по сравнению с алгоритмами, предполагающими неизменность вероятностных характеристик СП.

4. Синтезированы и исследованы алгоритмы обнаружения объектов в условиях априорной неопределенности относительно уровней яркости в разных спектральных диапазонах, угла поворота, масштаба и локального сдвига на фоне временных последовательностей пространственно неоднородных МЗИ, применение которых приводит к повышению эффективности обнаружения.

5. Синтезирован алгоритм сегментации, основанный на анализе оценок корреляционных характеристик МИ, позволяющий улучшить качество

обнаружения на реальном спутниковом материале за счет повышения точности прогноза в область предполагаемого нахождения сигнала.

6. Предложены алгоритмы улучшения качества тематического картографирования временных последовательностей спутниковых снимков и процедуры формирования прогнозов относительно расположения контролируемых объектов на базе разработанных ДС фильтров.

7. Предложены алгоритмы навигации и управления автономными летательными аппаратами, предполагающие нелинейное комплексирование информации, получаемой в результате совместной обработки данных пространственных дальномеров и бортовых видеокамер.

8. Предложена методика построения и оптимизации карт покрытия сетей сотовой подвижной связи, основанная на выполнении прогноза распространения радиосигнала с помощью смешанной модели МИ.

Практическая ценность результатов исследования заключается в следующем:

1. Полученные аналитические выражения для расчёта вероятностных характеристик и идентификации параметров смешанных моделей МИ и моделей с изменяющимися параметрами обеспечивают адекватное представление реальных данных.

2. Предложенные алгоритмы обработки изображений, основанные на смешанных моделях СП, могут быть использованы разработчиками перспективных систем обработки последовательностей неоднородных изображений.

3. Проведенные исследования известных и синтезированных процедур обнаружения протяженных аномалий на МЗИ дают разработчикам систем обработки таких изображений конкретные рекомендации по применению тех или иных решений в различных условиях.

4. Разработанное программное обеспечение позволяет непосредственно осуществлять обработку различных последовательностей МИ: при работе с данными дистанционного зондирования Земли, при навигации и позиционировании автономных транспортных средств, в робототехнике, медицине, задачах оптимизации покрытия сотовых сетей. Кроме того, возможно использование программного пакета для исследования базовых процедур обработки изображений, что может способствовать его применению в учебных целях.

Реализация результатов исследования

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении:

– грантов РФФИ №05-08-33712-а «Обнаружение аномалий с неизвестными параметрами на многозональных изображениях»; №09-01-00091-а «Математические модели многозональных изображений и их последовательностей»; №13-01-00308 «Синтез, вероятностный анализ и методы подгонки смешанных моделей последовательностей изображений на многомерных сетках»; №13-01-97048 «Разработка и анализ алгоритмов навигации автономных аппаратов, основанных на комплексировании данных

инерциальных систем и результатов обработки последовательностей изображений, полученных с бортовых камер»; №16-41-732027 р_офи_м «Построение стохастических моделей и алгоритмов обработки последовательностей неоднородных многозональных изображений для региональных систем экологического мониторинга»; № 18-47-730009p_a «Разработка алгоритмов обработки изображений, ориентированных на реализацию на мобильных устройствах, использующих RISC архитектуру»;

– программы «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (государственный контракт № 5422p/7966);

– программы «СТАРТ» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (государственный контракт № 7538p/10308);

– хозяйственных договоров с ФНПЦ АО «НПО «Марс», исполненных в 2015-2017 гг. и связанных с разработкой алгоритмов навигации и автоматического управления беспилотными летательными аппаратами.

Достоверность результатов исследования

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением современного математического аппарата, достаточным учетом влияющих факторов и заданных ограничений. Достоверность научных положений, выводов и методик подтверждена непротиворечивостью применяемых моделей и методов, результатами экспериментальных исследований. Полученные экспериментальные результаты подтверждают теоретические выводы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование в качестве основы описания неоднородных в пространстве изображений комбинаций ДС моделей позволяет адекватно представлять вероятностные свойства реальных многозональных изображений и их последовательностей.

2. Методика формирования изображений с изменяющимися в пространстве параметрами, основанная на применении комбинаций модифицированных вариантов ЕМ алгоритма и псевдоградиентных процедур, обеспечивает более точную (до 2 раз) подгонку моделей неоднородных изображений по сравнению с методикой оценивания в независимых скользящих окнах.

3. Метод и семейство дважды стохастической фильтрации изображений, описываемых с помощью ДС моделей, обеспечивает выигрыш до 3 раз по дисперсии ошибки фильтрации по сравнению с линейными фильтрами.

4. Метод обнаружения сигналов на фоне неоднородных изображений со сложной структурой позволяет повысить эффективность обнаружения до 3-5 дБ по уровню сигнала в сравнении с аналогами, предполагающими линейную оценку в область возможного нахождения объекта.

5. Синтезированный алгоритм сегментации МЗИ, учитывающий его межкадровые корреляционные характеристики, позволяет улучшить качество обработки на 15-30% в сравнении с известными алгоритмами по количеству верно отнесенных пикселей.

6. Комплекс исследовательских программ для имитации последовательностей МИ, проверки адекватности и эффективности разработанных алгоритмов отличается простотой использования и позволяет применять алгоритмы обработки изображений на базе ДС моделей СП для решения разнообразных теоретических и прикладных задач обработки МИ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики:

5. *Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечениях, разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений.*

7. *Разработка методов распознавания образов, фильтрации, распознавания и синтеза изображений, решающих правил. Моделирование формирования эмпирического знания.*

14. *Разработка теоретических основ создания программных систем для новых информационных технологий.*

Апробация результатов

Основные результаты работы обсуждались и получили положительную оценку на международных конференциях: «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» (Самара, 2013); «Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding» (Koblenz, Germany, 2014); «Математические методы и модели: Теория, приложения и роль в образовании» (Ульяновск, 2014); «NEW2AN 2015 Conference» (Санкт-Петербург, 2015); Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии – КрыМиКо'2016» (Севастополь, 2016); «International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, REIT 2017» (Екатеринбург, 2017); «International Conference on Information Technology and Nanotechnology (Самара, 2017, 2018, 2019); Международный московский IEEE-семинар, MWENT – 2018 (Москва, 2018); International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (Montréal, Canada, 2018); 22nd International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems (Belgrad, Serbia, 2018); Fuzzy Technologies in the Industry FTI-2018 (Ульяновск, 2018); «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA» (Москва, 2014, 2015, 2017, 2018); Научных сессиях, посвященных дню радио (Москва, 2016, 2017, 2018) и Всероссийских конференциях: «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2013, 2015, 2017, 2019), а также на конференциях профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета (2014-2019 гг.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы отражены в 148 публикациях, среди которых 54 статьи, в том числе 31 в журналах из перечня ВАК, 1 монография, 92 работы в трудах и материалах Международных и Всероссийских конференций и семинаров. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 патента

на полезную модель и 2 патента на изобретение. В автореферате представлена 61 наиболее важная публикация.

Личный вклад автора

На всех этапах выполнения работы автор принимал личное участие в исследовании, планировании и выполнении экспериментов, анализе полученных результатов и формулировании выводов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 406 страницах машинописного текста, включая 145 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 324 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и основные задачи, показана научная новизна и практическая ценность работы, выбраны методы исследования, а также обозначены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор известных математических моделей МИ и их последовательностей, рассмотрены основные алгоритмы обработки и проблемы описания неоднородных в пространстве изображений, сформулированы основные задачи исследований.

Анализ моделей, применяемых в настоящее время для описания МИ, позволил сделать вывод об отсутствии универсального способа формирования СП с заданными характеристиками. Несмотря на многообразие таких моделей, они все имеют недостатки, главными из которых являются отсутствие удовлетворительного решения задачи адекватного описания пространственно-неоднородных изображений и их последовательностей, существенное увеличение вычислительных затрат при повышении сложности моделей и значительные трудности анализа многомерных изображений, полученных при использовании неавторегрессионных моделей СП.

Анализ рассмотренных методов фильтрации показывает, что в настоящее время отсутствуют универсальные алгоритмы для решения данной задачи. В зависимости от характера искажений на изображении наиболее эффективны те или иные алгоритмы. Во многом это связано с используемыми частными математическими моделями, предназначенными для решения узких практических задач.

Исследования наиболее часто применяемых процедур обнаружения объектов и аномалий на изображениях показали, что большая их часть связана с реализацией правил по сравнению характеристик области, потенциально содержащей аномалию, с некоторой окрестностью. При этом выбор указанных характеристик зачастую носит эвристический характер. Недостатком таких алгоритмов является отсутствие аналитических оценок эффективности обнаружения протяженных аномалий при наличии мешающих изображений подстилающей поверхности.

Таким образом, в настоящее время актуальна разработка таких моделей, которые позволили бы преодолеть указанные недостатки и не требовали значительного увеличения вычислительных затрат. Такими моделями могут быть, например, комбинации уже известных математических описаний в рамках ДС АР моделей. Такой подход позволит разработать механизмы формирования квазинеоднородных МИ, близких по своим корреляционным свойствам к реальным сигналам. Для их широкого распространения необходимо разработать математический аппарат, позволяющий синтезировать и исследовать разнообразные алгоритмы обработки изображений.

Во второй главе для описания квазинеоднородных изображений предложено использование моделей СП с изменяющимися параметрами, получены аналитические выражения для расчета вероятностных характеристик ДС моделей СП разных типов, исследованы зависимости вероятностных характеристик ДС моделей от различных параметров, рассмотрены возможности аппроксимации реальных изображений с помощью моделей с изменяющимися параметрами.

Рассмотрим следующую математическую модель СП, заданного на прямоугольной N – мерной сетке $\Omega = \{\bar{l} = (i_1, (i_2, \dots, i_N): (i_k = 1, 2, \dots, M_k), k = 1, 2, \dots, N)\}$:

$$x_{\bar{l}} = \alpha_{\bar{l}} + \sum_{\bar{j} \in D_{\bar{l}}} \rho_{\bar{l}, \bar{j}} x_{\bar{l} - \bar{j}} + \beta_{\bar{l}} \xi_{\bar{l}}, \bar{l} \in \Omega, \quad (1)$$

где $X = \{x_{\bar{l}}, \bar{l} \in \Omega\}$ – моделируемое СП, определенное на Ω , $\{\alpha_{\bar{l}}, \rho_{\bar{l}, \bar{j}}, \beta_{\bar{l}}: \bar{l} \in \Omega, \bar{j} \in D_{\bar{l}}\}$ – коэффициенты модели; $\Xi = \{\xi_{\bar{l}}, \bar{l} \in \Omega\}$ – порождающее белое СП; $D_{\bar{l}}$ – каузальная область локальных состояний для точки $\bar{l}$. Будем считать, что коэффициенты $\alpha_{\bar{l}}, \rho_{\bar{l}, \bar{j}}, \beta_{\bar{l}}$ данной модели являются случайными величинами (СВ), образующими вспомогательные СП $A = \{\alpha_{\bar{l}}, \bar{l} \in \Omega\}$, $B = \{\beta_{\bar{l}}, \bar{l} \in \Omega\}$, $P_j = \{\rho_{\bar{l}, \bar{j}}, \bar{l} \in \Omega\}$. Случайный характер коэффициентов модели (1) позволяет ее использовать для описания неоднородных в пространстве и нестационарных по времени МИ. Важным частным случаем такой модели является ДС на базе АР моделей с кратными корнями (АРКК). Такие модели могут быть записаны в виде:

$$x_{\bar{l}} = A + a_{\bar{l}} + F_{ARMR(\bar{K})}(\bar{m}_{\rho} + \bar{\rho}_{\bar{l}}(B + b_{\bar{l}})\beta_{\bar{l}}\xi_{\bar{l}}), \quad (2)$$

где A, B – некоторые числа, характеризующие средние математическое ожидание и дисперсию изображения; $\bar{m}_{\rho}$ – вектор параметров, определяющих усредненные корреляционные свойства изображения; $F_{ARMR(\bar{K})}(\bar{\rho}, b\xi_{\bar{l}})$ – преобразование, соответствующее многомерной АРКК модели:

$$\prod_{i=1}^N (1 - \rho_i z_i^{-1})^{K_i} x_{\bar{l}} = b\beta\xi_{\bar{l}}, \quad (3)$$

где K_i коэффициенты, определяющие кратность корней характеристического уравнения; β – нормирующий коэффициент; z_k^{-1} – оператор сдвига $z_k^{-1}x_{\bar{l}} = x_{i_1, \dots, i_k - l, \dots, N}$; $a_{\bar{l}} = F_{ARMR(\bar{K}_a)}(\bar{r}_{\alpha}, \gamma_{\alpha}\xi_{\alpha\bar{l}})$, $\rho_{\bar{l}} = \{F_{ARMR(\bar{K}_{\rho_1})}(\bar{r}_{\rho_1}, \gamma_1\xi_{1i_j}), \dots,$

$F_{ARMR(\bar{K}_{\rho N})}(\bar{r}_{\rho N}, \gamma_N \xi_{Nij})\}, b_{\bar{i}} = F_{ARMR(\bar{K}_b)}(\bar{r}_b, \gamma_b \xi_{b\bar{i}})$ – СВ, определяемые АРКК моделью; $\bar{i} = \{i_1 = 1, \dots, M_1, \dots, i_N = 1, \dots, M_N\}$. Представленная модель допускает возможность изменения параметров МИ в зависимости от текущих пространственных координат. Важным свойством модели (2) является квазиизотропность ковариационной функции (КФ) порождаемых СП. На рисунке 1 представлены реализация ДС модели (2) для двумерного случая (а), вспомогательные СП $\{a_{i,j}\}$ (б), СП $\{b_{i,j}\}$ (в), СП $\{\rho_{i,j}\}$ (г).

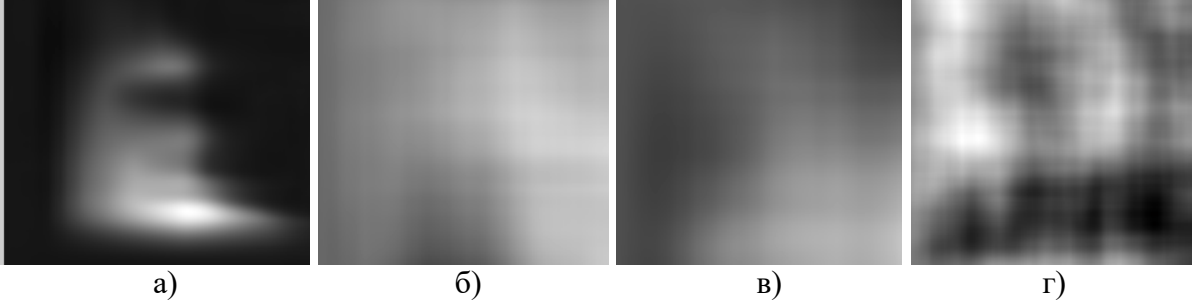


Рисунок 1 – Реализация ДС модели и вспомогательных СП

К сожалению, КФ СП, порожденных ДС моделями, в общем случае описывается весьма сложными выражениями, обусловленными наличием сложных корреляционных связей между основным и вспомогательными СП. Тем не менее, КФ может быть найдена для важного частного случая медленного (по сравнению с интервалом корреляции формируемого СП) изменения вспомогательных СП. Тогда, например, КФ одномерной ДС модели первого порядка имеет вид:

$$B(k) \cong \sigma_x^2 \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{k}{2} \rfloor} C_k^{2j} \sigma_\rho^{2j} m_\rho^{k-2j} (2j-1)!! \quad (4)$$

где $\lfloor \frac{k}{2} \rfloor$ – округление к меньшему; $C_k^j = \frac{k!}{j!(k-j)!}$; $(2j-1)!!$ определяется как произведение всех натуральных нечетных чисел на отрезке $[1, (2j-1)]$. В диссертации представлены КФ двумерной ДС модели на базе АРКК моделей произвольного порядка.

Анализируя полученные КФ, можно сделать вывод о том, что с увеличением расстояния k_1 уменьшение КФ дважды стохастического СП происходит медленнее, чем у СП на основе АРКК модели.

При описании реальных сигналов необходимо также решать задачу идентификации параметров ДС модели. Для двумерного случая это означает, что формируемое с помощью ДС модели СП должно иметь характеристики реального изображения $\{z_{i,j}\}$. При этом параметры $\bar{\theta} = (\sigma_a^2, \rho_{1a}, M_{1a}, \dots, \rho_{Na}, M_{Na})$, определяющие поведение СП $\{a_{\bar{i}}\}$, могут быть определены с помощью ПГ релаксации из максимума выражений:

$$F_i(\sigma_a^2, \rho_{ia}, M_{ia}) = \sum_{j=1}^{M_i} \left(\sum_{j_1=1}^{M_1} \dots \sum_{j_N=1}^{M_N} z_{j_1, \dots, j_N} (B_{z_i}^{-1} - B_{a_i}(\sigma_a^2, \rho_{ia}, M_{ia})^{-1}) z_{j_1, \dots, j_i + j, \dots, j_N} \right), \quad (5)$$

где B_{z_1} – диагональная матрица $M_j \times M_j$, составленная из оценок КФ СП $\{z_{\bar{i}}\}$ вдоль строк по i -му измерению; B_{a_i} – КФ одномерной АРКК модели. Оценка параметров, определяющих поведение вспомогательных СП $\{\bar{\rho}_{\bar{i}}\}$, связана с поиском корней функционала:

$$\varphi(\bar{\rho}_{\bar{i}}) = F_{ARMR(\bar{K})}(\bar{m}_{\rho} + \bar{\rho}_{\bar{i}}, 0) - z_{\bar{i}} \quad (6)$$

в каждой точке $\bar{i} \in \Omega$. При этом векторы $\bar{K}$ и $\bar{m}_{\rho}$ могут быть найдены на основе минимизации по L_2 норме разницы между КФ наблюдений и КФ предполагаемой АРКК модели $\|B_z - B_{ARKK(\bar{K}, \bar{m}_{\rho})}\|$. С учетом разделимости КФ АРКК модели такая минимизация вместе с определением корней (6) может быть выполнена с помощью ПГ алгоритмов. Для совокупности оценок $\{\hat{\rho}_{\bar{i}}\}$ и $\{\hat{b}_{\bar{i}} = (z_{\bar{i}} - \hat{A})^2 - \hat{B}\}$ в соответствии с этой же схемой могут быть определены параметры $\{\bar{r}_{\rho 1}, \dots, \bar{r}_{\rho N}, \bar{r}_b, \gamma_1, \dots, \gamma_N, \gamma_b\}$. На рисунке 2 представлены зависимости СКО идентификации корреляционных параметров $\varepsilon_{m_{\rho}} = \sqrt{M(\hat{m}_{\rho i} - m_{\rho i})^2}$ и $\varepsilon_r = \sqrt{M(\hat{m}_{rij} - m_{rij})^2}$ от дисперсии основного СП σ_x^2 , и дисперсии вспомогательного СП σ_{ρ}^2 .

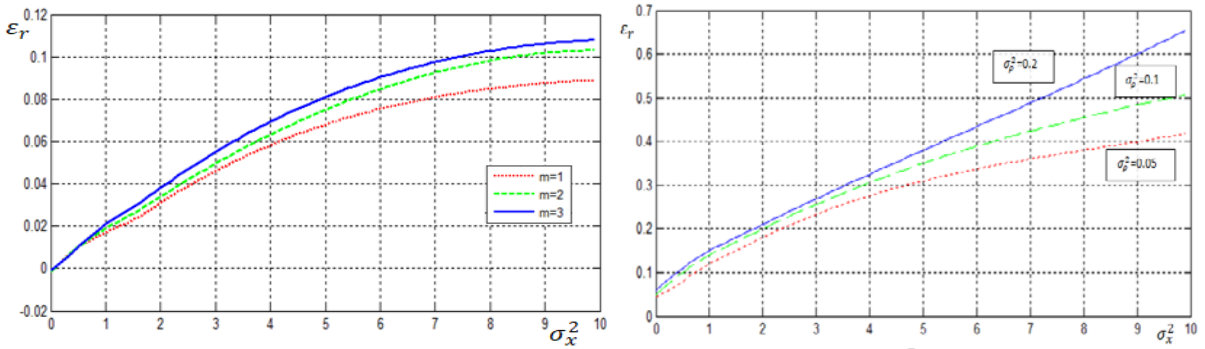


Рисунок 2 – Зависимость точности идентификации параметров от свойств СП

На рисунке 3 представлен пример использования предложенной методики идентификации и имитации реального изображения: a – реальное изображение размером 250×250 ; b – реализация СП, порожденного ДС моделью на основе АРКК модели кратности (2,2); $в$ – реализация СП, порожденного дважды стохастической моделью на основе АРКК модели кратности (1,1); $г$ – реализация СП, порожденного АР моделью первого порядка. Дисперсии ошибок подгонки, найденные как средняя величина квадратов расхождения значений яркости реального изображения и реализаций СП, составили: b – 0,49; $в$ – 0,37; $г$ – 0,96.

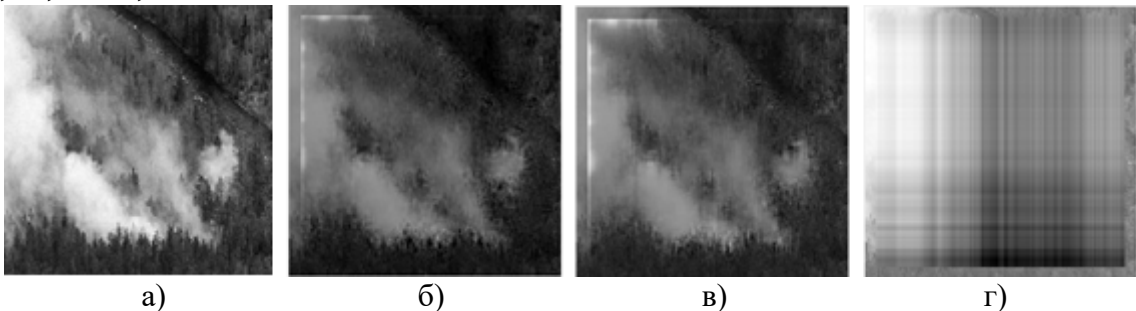


Рисунок 3 – Формирование изображения с изменяющимися свойствами

В третьей главе синтезированы и исследованы алгоритмы оптимальной и квазиоптимальной фильтрации, алгоритмы восстановления участков изображений на основе дважды стохастических моделей СП, а также выполнена проверка адекватности применения разрабатываемых алгоритмов при обработке реальных изображений.

Для синтеза алгоритмов фильтрации СП ДС модель (1) представлена в виде следующего векторного стохастического уравнения:

$$\bar{x}_i = \varphi_i(\bar{x}_{i-1}) + \bar{\xi}_i, \quad (7)$$

где $\bar{\xi}_i$ – вектор, составленный из нормальных СВ с КФ $V_{\xi i}$. На основе использования центральной предельной теоремы для мартингалов показано, что для ДС модели распределение вектора СВ $\bar{x}_i$ с ростом индекса i можно аппроксимировать нормальным. Тогда наилучшая оценка $\hat{\bar{x}}_{Wi}$ находится как решение задачи поиска условного экстремума $W_k(X_k, \xi_k) = \sum_{i=1}^k (\frac{\bar{\xi}_i^T V_{\xi i}^{-1} \bar{\xi}_i}{2} - f_i(\bar{x}_i, \bar{z}_i))$ при ограничении $\bar{x}_i = \varphi_{i-1}(\bar{x}_{i-1}) + \bar{\xi}_i$. Для получения рекуррентных оценок $\hat{\bar{x}}_i$ из $\hat{\bar{x}}_{Wi}$ в диссертации использован метод инвариантного погружения.

Рассмотрим несколько важных примеров. Пусть двумерное изображение $\{x_{i,j}\}$ может быть описано моделью (2) при $N = 2$, $\bar{K} = \bar{K}_{\rho 1} = \bar{K}_{\rho 2} = (2, 2)^T$. Пусть производятся наблюдения смеси $z_{i,j} = x_{i,j} + n_{i,j}$ информационного СП и аддитивного белого гауссовского СП $\{n_{i,j}\}$ с дисперсией $\sigma_n^2 = M(n_{i,j}^2)$. Для решения задачи восстановления отчетов $\{x_{i,j}\}$ по наблюдениям $\{z_{i,j}\}$ можно составить вектор элементов $\bar{x}_{i,j} = (\bar{x}_{xi,j}, \bar{\rho}_{1i,j}, \bar{\rho}_{2i,j})$ длиной $6M_1 + 6$, где $\bar{x}_{xi,j} = (x_{i,j}x_{i,j-1} \dots x_{i,1}x_{i-1,M_1} \dots x_{i-1,1}x_{i-2,M_1} \dots x_{i-2,j-2})^T$, $\bar{\rho}_{ni,j} = (\rho_{ni,j}\rho_{ni,j-1} \dots \rho_{ni,1}\rho_{ni-1,M_1} \dots \rho_{ni-1,1}\rho_{ni-2,M_1} \dots \rho_{ni-2,j-2})^T$, $n = 1, 2$. Тогда модель (2) можно записать в компактном векторном виде $\bar{x}_{i,j} = \varphi_{i,j}(\bar{x}_{i,j}) + \bar{\xi}_{i,j}$, $\bar{\xi}_{i,j} = (\xi_{i,j}, \xi_{\rho 1i,j}, \xi_{\rho 2i,j})$. Используя эти соотношения, получим двумерный ДС фильтр:

$$\hat{\bar{x}}_{i,j} = \hat{\bar{x}}_{\bar{z}i,j} + B_{i,j}(z_{i,j} - \hat{x}_{\bar{z}i,j}), \quad (8)$$

где $\hat{x}_{\bar{z}i,j}$ – первый элемент вектора $\hat{\bar{x}}_{\bar{z}i,j}$; $B_{i,j} = P_{Ei,j}C^T D_{i,j}^{-1}$; $C = (1, 0, \dots, 0)$; $D_{i,j} = CP_{Ei,j}C^T + \sigma_n^2$; $P_{Ei,j} = \varphi_{i,j-1}'(\hat{\bar{x}}_{i,j-1})P_{i,j-1}\varphi_{i,j-1}'(\hat{\bar{x}}_{i,j-1})^T + V_{\xi i,j}$; Несмотря на внешнюю громоздкость, полученный алгоритм не требует обращения матриц большого размера как при построном калмановском оценивании [3]. Во-вторых, при формировании оценки в точке (i, j) используются все элементы слева и сверху от этой точки, а входящие в вектор $\hat{\bar{x}}_{i,j}$ элементы, предшествующие $\hat{x}_{i,j}$, переоцениваются. В-третьих, результатом фильтрации является не только совокупность оценок $\hat{x}_{i,j}$, но и оценки корреляционных связей $\hat{\rho}_{1i,j}$ и $\hat{\rho}_{2i,j}$. Такая особенность позволяет использовать ДС фильтр не только для компенсации шума, но и для текстурно-корреляционного анализа.

Предложенный метод фильтрации близок по своей структуре к векторному фильтру Калмана. На рисунке 4 представлены дисперсии фильтрации строки пространственно однородного изображения в случае использования векторного фильтра Калмана и нелинейной ДС фильтрации.

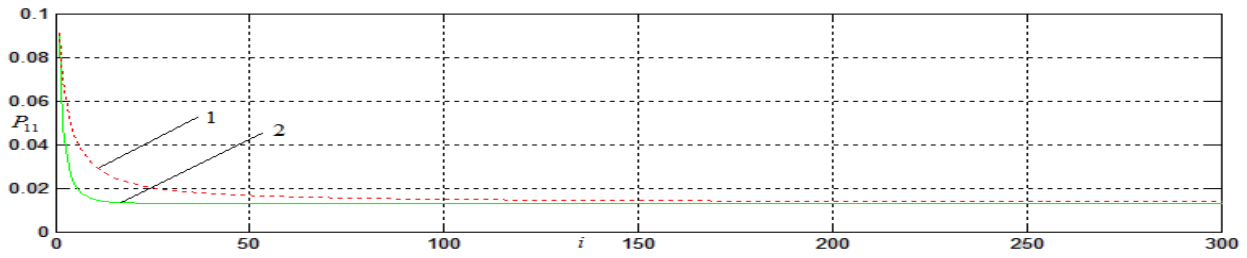


Рисунок 4 – Дисперсии ошибок для ДС фильтра (1) и линейной калмановской фильтрации (2)

Можно заметить, что ДС фильтр незначительно проигрывает фильтру Калмана в начале строки в ходе процесса стабилизации. С ростом количества элементов наблюдается сходимость к фильтру Калмана. Полученный результат позволяет утверждать, что процедуры близки между собой при фильтрации однородных изображений с известными корреляционными параметрами. В случае обработки пространственно неоднородных сигналов предложенный ДС фильтр обеспечивает выигрыш тем больший, чем более высокой является степень неоднородности изображений.

На рисунке 5 представлены зависимости дисперсии ошибки фильтрации изображения от дисперсии шума (A1 – векторный фильтр Калмана без интерполяции; A2 – дискретный фильтр Винера, A3 – фильтр Калмана с интерполяцией, A4 – ДС фильтр). Анализ показывает, что выигрыш предложенного метода фильтрации составляет до 120% по уровню дисперсии ошибки оценивания. Более того, имеет место еще более сильный результат. ДС фильтр в среднем выигрывает до 15-20% по уровню дисперсии ошибки оценивания у фильтров A1-A3 даже в том случае, если последние применяются уже к сегментированному изображению. Это объясняется возможностью адаптивной подстройки параметров ДС фильтра под изменяющиеся вероятностные и корреляционные параметры изображения.

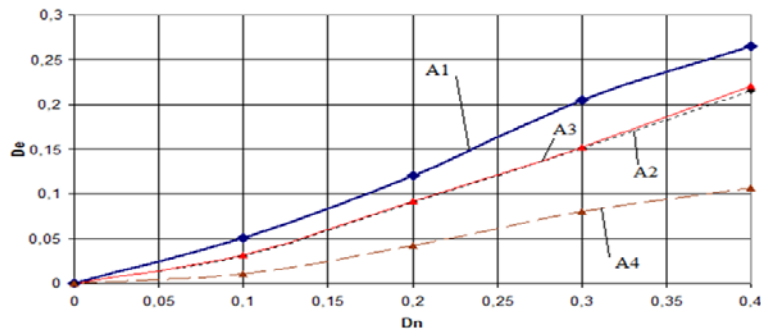


Рисунок 5 – Эффективность фильтрации спутникового изображения

Представленное решение может быть обобщено на случай фильтрации поля $\{\bar{x}_i\}$ в скользящих по сетке Ω окнах. В диссертации показано, что любая ДС модель (1) может быть записана как

$$\bar{X}_{i,j} = P_{i,j}\bar{X}_{i,j-1} + Q_{i,j}\bar{X}_{i-1,j} + \vartheta_{ij}\bar{\xi}_{ij}, \quad (9)$$

где $\bar{X}_{i,j}$ – совокупность отсчетов основного и вспомогательных полей, расположенных в окне с центром в точке (i,j) ; $P_{i,j}$ и $Q_{i,j}$ – тензоры, зависящие в том числе от отсчетов, входящих в $\bar{X}_{i,j-1}$ и $\bar{X}_{i-1,j}$. Если считать корреляционные свойства близкими по строке и столбцу, а скорость их изменения настолько

низкой, что в пределах окна $\bar{X}_{i,j}$ корреляция может быть описана только одним параметром $\rho_{i,j}$, то процесс фильтрации можно существенно упростить, используя обработку «змейкой» или построчную фильтрацию в параллельных потоках с задержкой на условный такт.

Заметим, что все перечисленные фильтры позволяют на каждом шаге получать в том числе локальную оценку корреляционных характеристик изображения. Это дает возможность адаптировать размер окна фильтрации под оцененные характеристики в процессе самой фильтрации. Такую адаптацию можно интерпретировать как определение для каждого элемента СП с номером (i, j) некаузальной области, определяющей значение СП в данной точке.

Для анализа эффективности найденных алгоритмов была выполнена серия экспериментов, направленных на обработку типовых спутниковых изображений. Примеры таких изображений представлены на рисунке 6. Перед фильтрацией эти изображения были смешаны с белым шумом разной интенсивности так, что отношение сигнал/шум $q = \sigma_x^2 / \sigma_n^2$ менялось в диапазоне от 2 до 10.

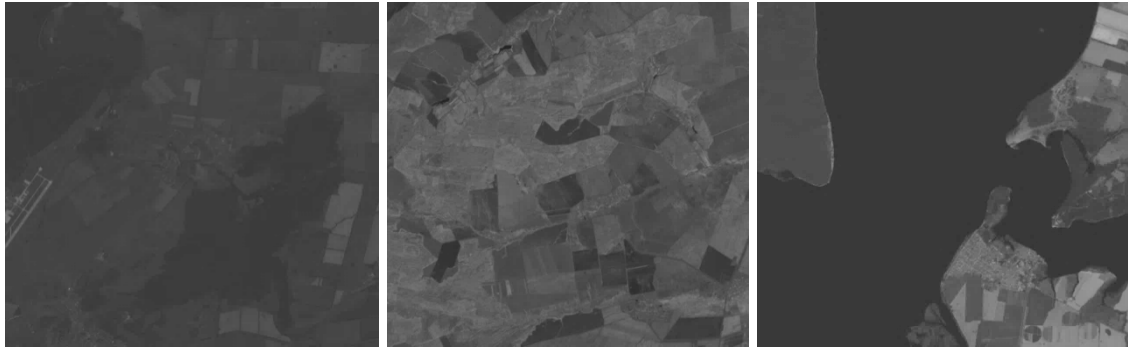


Рисунок 6 — Фрагменты многозональных изображений

В таблице 1 представлен сравнительный анализ эффективности описанных процедур в сравнении с LPA/ICI алгоритмом, вейвлет-фильтром с SURE порогом, разделимым билатеральным фильтром и ДС фильтром по относительной дисперсии ошибки фильтрации (MSE/σ_x^2).

Анализ результатов свидетельствует о достаточной эффективности предложенных способов фильтрации. Это связано с наличием на фильтруемых изображениях протяженных областей, в пределах которых ДС фильтры успевают адаптироваться к локальным особенностям изображений. При этом качество обработки при использовании параллельно скользящих и взаимосвязанных окон оказывается даже выше, чем у формально оптимальных ДС фильтров. Это объясняется наличием четких границ на исходных изображениях, приводящих к локальному рассогласованию оптимального ДС фильтра. Его аналог для обработки в некаузальных окнах имеет существенно более компактную рабочую область и быстрее адаптируется к резким изменениям свойств изображения. Кроме того, очевиден выигрыш на 2-3 порядка в количестве вычислительных операций. В результате, реализованные на CUDA архитектуре алгоритмы оказываются существенно быстрее, чем применяемые в графических редакторах. При этом выигрыш может быть

существенно увеличен в случае использования специальных методик оптимизации операций с учетом разреженности используемых тензоров.

Таблица 1 – Сравнительный анализ эффективности алгоритмов фильтрации

Алгоритм фильтрации	Изображение	Время обработки	q=2	q=5	q=10
LPA/ICI алгоритм	№1	23 сек.	0.076	0.042	0.031
	№2	18 сек.	0.067	0.036	0.028
	№3	28 сек.	0.083	0.045	0.032
Вейвлет-фильтрация с SURE-порогом	№1	14 сек.	0.083	0.065	0.053
	№2	13.5 сек.	0.081	0.061	0.049
	№3	14 сек.	0.087	0.064	0.051
Билатеральный фильтр (на основе параллельной декомпозиции)	№1	0.8 сек.	0.112	0.091	0.071
	№2	0.7 сек.	0.097	0.083	0.063
	№3	0.8 сек.	0.107	0.089	0.076
Дважды стохастический фильтр	№1	17 мин. 56 сек.	0.089	0.048	0.036
	№2	17 мин 39 сек.	0.083	0.042	0.033
	№3	18 мин 19 сек.	0.092	0.051	0.041
Дважды стохастическая фильтрация в параллельно скользящих окнах	№1	4.4 сек.	0.076	0.04	0.03
	№2	4.3 сек.	0.064	0.035	0.026
	№3	4.4 сек.	0.083	0.045	0.031

Представленные результаты могут быть обобщены на случай обработки МЗИ. Для этого предположим, что все N двумерных кадров этого МЗИ задаются СП $\{x_{i,j}^k\}$, $k = 1..n$, на одной и той же сетке Ω . Пусть в результате наблюдений определена матрица R межкадровых корреляций. Будем также считать, что особенности регистрации объектов на этих кадрах обеспечивает близость внутрикадровых корреляционных характеристик. Тогда первый кадр МЗИ можно описать с помощью модели (2), а для описания второго и последующих кадров можно воспользоваться следующим соотношением:

$$x_{i,j}^k = \sum_{l=1}^k R(l,k)x_{i,j}^l + \sum_{i_1=1}^{M_1} \sum_{j_1=1}^{M_2} v_{i_1,j_1} \xi_{i_1,j_1}^k, \quad (10)$$

где v_{i_1,j_1} – элементы треугольной матрицы V , такой что $VV^T = B$; B – ковариационная матрица первого кадра.

Соотношения (10) позволяют модифицировать предложенные фильтры для случая МЗИ. Для этого ранее необходимо пополнить вектор $\bar{x}_{xi,j}$ скалярными отчетами $x_{i,j}^2, \dots, x_{i,j}^N$ и вновь записать нелинейное равенство $\bar{x}_{i,j} = \varphi_{i,j}(\bar{x}_{i,j}) + \bar{\xi}_{i,j}$ с учетом соответствующих изменений в векторе $\bar{\xi}_{i,j}$. Тогда для фильтрации можно воспользоваться предложенными алгоритмами, учитывая, что в каждой точке с координатами (i,j) имеется не одно скалярное наблюдение $z_{i,j}$, а вектор таких наблюдений, элементы которого соответствуют значениям МЗИ в точке (i,j) на соответствующем кадре.

На рисунке 7 представлены зависимости эффективности фильтрации от количества кадров МЗИ (7а) и коэффициента межкадровой корреляции (7б). Предполагалось, что $R(i,j)$ одинаково для любой пары двумерных кадров, входящих в МЗИ. При этом кривая (1) соответствует случаю одновременной обработки двух кадров, кривая (2) – четырех кадров, кривая (3) – 10 кадров.

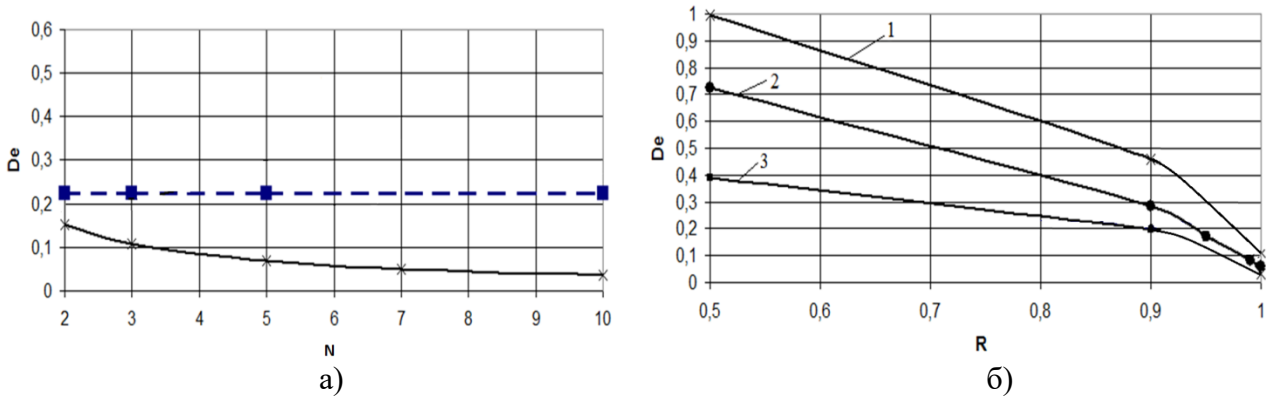


Рисунок 7 – Эффективность фильтрации многозонального изображения

Анализ показывает, что с ростом количества используемых для обработки спектральных диапазонов эффективность обработки существенно возрастает.

Отметим, что использование ДС фильтра как инструмента получения яркостных и корреляционных характеристик изображения, позволяет решить важную задачу определения границ между объектами на изображениях. Для этого достаточно выполнить фильтрацию изображения в прямом и обратном направлении, получив соответственно оценки $\{\hat{x}_{\bar{l}} = (\hat{x}_{\bar{l}}, \hat{\alpha}_{\bar{l}}, \hat{\rho}_{1\bar{l}}, \dots, \hat{\rho}_{N\bar{l}}, \hat{\beta}_{\bar{l}})\}$ и $\{\hat{\bar{x}} = (\hat{\bar{x}}_{\bar{l}}, \hat{\bar{\alpha}}_{\bar{l}}, \hat{\bar{\rho}}_{1\bar{l}}, \dots, \hat{\bar{\rho}}_{N\bar{l}}, \hat{\bar{\beta}}_{\bar{l}})\}$, а затем определить для соседних точек ($\bar{l}$) и ($\bar{j}$) статистику $L = \sum_{\bar{l} \in D_{\bar{l}}} (\hat{x}_{\bar{l}} - \hat{\bar{x}}_{\bar{l}}) K_1(\bar{l}) (\hat{x}_{\bar{l}} - \hat{\bar{x}}_{\bar{l}})^T$, где $K_1(\bar{l})$ – тензорный коэффициент. Если L больше порогового значения L_0 , то принимается решение о наличии границы между точками ($\bar{l}$) и ($\bar{j}$). Это обусловлено тем, что ДС фильтр при переходе явной границы между двумя объектами, каждый из которых описывается своей реализацией ДС модели, демонстрирует кратковременное увеличение дисперсии ошибки оценивания тем большее, чем более явной является разница между этими объектами. На рисунке 8 в качестве иллюстрации представлено искусственное ДС изображение (а), статистика L (б), фрагмент реального спутникового снимка (в) и статистика L (г).

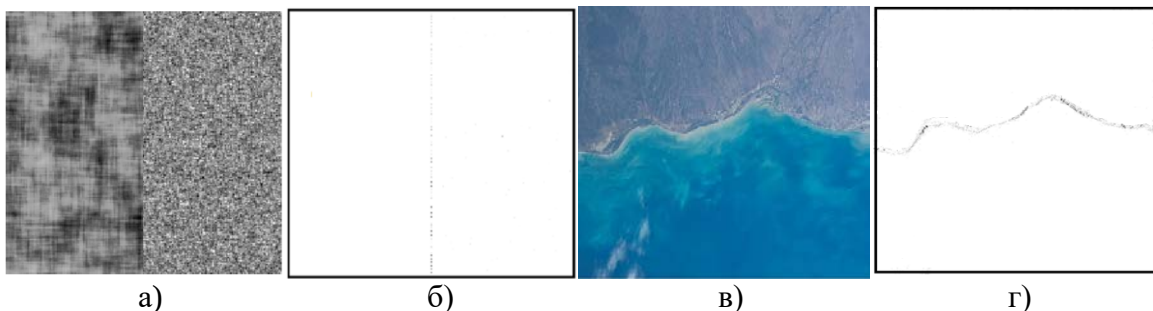


Рисунок 8 – Выделение границ на изображении с помощью двухпроходного ДС фильтра

Найденные решения возможно обобщить на случай обработки временной последовательности МЗИ. Для этого был использован тензорный вариант расширенного фильтра Калмана, комбинированный с результатами фильтрации отдельного МЗИ. При этом считалось, что пространственные сетки $J_0, J_1, \dots, J_N$, на которых заданы многозональные изображения во временной последовательности, являются идентичными и каждый вектор-элемент

последующего МЗИ может быть описан с помощью следующего тензорного стохастического уравнения:

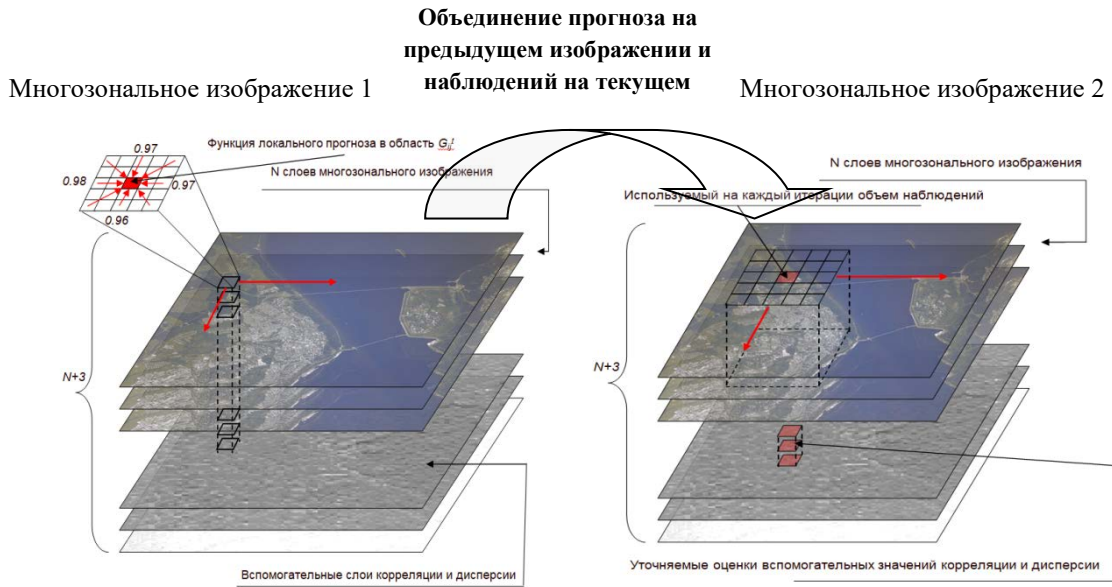
$$\bar{x}_{i,j}^t = \varphi_{i,j}^t(\bar{x}_{k,l}^{t-1}) + v_{i,j}^t(\bar{x}_{k,l}^{t-1})\bar{\xi}_{i,j}^t, k, l \in J_{t-1}, \quad (11)$$

где $\varphi_{i,j}^t(\bar{x}_{k,l}^{t-1})$ и $v_{i,j}^t(\bar{x}_{k,l}^{t-1})$ – некоторые функционалы. Будем считать, что для тензора $\varphi_{i,j}^t$ существует пространственная матрица производных $\varphi_{i,j}^{t'}(\bar{x}_{k,l}^{t-1})$, а отчеты $\bar{x}_{i,j}^t$ наблюдаются на фоне аддитивного шума. Если считать, что кадры МЗИ пространственно совмещены, а промежуток времени между регистрациями таких МЗИ мал, то пространственная область $G_{ij}^{t-1} = \{k, l: \hat{x}_{ij}^{t-1} = \varphi_{ij,local}^{t-1}(\bar{x}_{i1,j1}^{t-1})\}$ на $(t-1)$ -м МЗИ близка к аналогичной области G_{ij}^t на t -м МЗИ. Тогда, считая совместную КФ всей последовательности разделимой по времени и пространству, можно записать следующее выражение, позволяющее объединять оценки в предыдущий момент времени и текущие наблюдения:

$$\hat{x}_{i,j}^t = \rho \varphi_{ij,local}^{t-1}(\{\bar{x}_{i1,j1}^{t-1}: i1, j1 \in G_{i,j}^{t-1}\}) + P_{i,j,k,l}^t V_{\theta}^{t-1} (C^T z_{k,l}^t - \rho \varphi_{ij,local}^{t-1}(\{\bar{x}_{i1,j1}^{t-1}: i1, j1 \in G_{i,j}^{t-1}\})), k, l \in G_{ij}^{t-1} \quad (12)$$

с начальными условиями $P_{\theta i,j}^1 = R_{x1x2}^t(|i-j|, |k-l|) R_{x3} V_{\theta i,j}^{1-1}$.

На рисунке 9 в виде графической иллюстрации представлен процесс последовательного объединения оценок на предыдущем изображении и наблюдений на текущем МЗИ.



Представленные алгоритмы можно объединить в виде схемы обработки на рисунке 10. Анализ МЗИ в соответствии с этой схемой может включать дополнительные процедуры, упрощающие обработку, например алгоритмы тематической обработки спутниковых МЗИ.



Рисунок 10 – Схема обработки последовательности МЗИ

В таблице 2 приведены результаты сравнительного анализа эффективности найденных процедур обработки спутниковых изображений, приведенных на рисунке 6, для случаев обработки отдельного кадра, всего МЗИ, ДС фильтрации (8), тензорной фильтрации временной последовательности МЗИ.

Таблица 2 – Результаты сравнительного анализа эффективности найденных процедур

Алгоритм	Изображение1				Изображение2				Изображение3			
	$t = 1$	$t = 2$	$t = 4$	$t = 8$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 4$	$t = 8$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 4$	$t = 8$
ЛРААлгоритм (BLUE диапазон)	0.028	0.026	0.029	0.028	0.02	0.021	0.021	0.022	0.027	0.031	0.028	0.027
Алгоритм (6) (BLUE диапазон)	0.033	0.035	0.033	0.034	0.028	0.026	0.032	0.031	0.034	0.035	0.034	0.031
Алгоритм (6) для отдельного многозонального изображения	0.027	0.028	0.028	0.026	0.021	0.023	0.022	0.02	0.028	0.029	0.027	0.028
Алгоритм, основанный на использовании тензорного фильтра	0.023	0.020	0.018	0.017	0.018	0.015	0.014	0.014	0.022	0.018	0.017	0.017

Анализ представленных данных показывает, что модификации ДС фильтра действительно позволяют выполнять совместную обработку всех кадров МЗИ и осуществлять обработку временной последовательности МЗИ. При использовании предложенных методик выигрыш может достигать 80% в сравнении с ЛРА алгоритмом.

Описанные алгоритмы могут быть применены для решения задачи восстановления спутниковых изображений в том случае, когда фрагменты этих изображений повреждены или являются недостоверными. Для этого можно объединить экстраполированные оценки, полученные по имеющимся наблюдениям в предыдущие и текущий моменты времени. Для иллюстрации на рисунке 11 представлены фрагменты исходного изображения, содержащего локальную облачность (рисунок 11, а), результат восстановления изображения (рисунок 11, б), график, характеризующий дисперсию ошибки

фильтрации/восстановления в результате использования двухэтапной процедуры восстановления (рисунок 11, в).

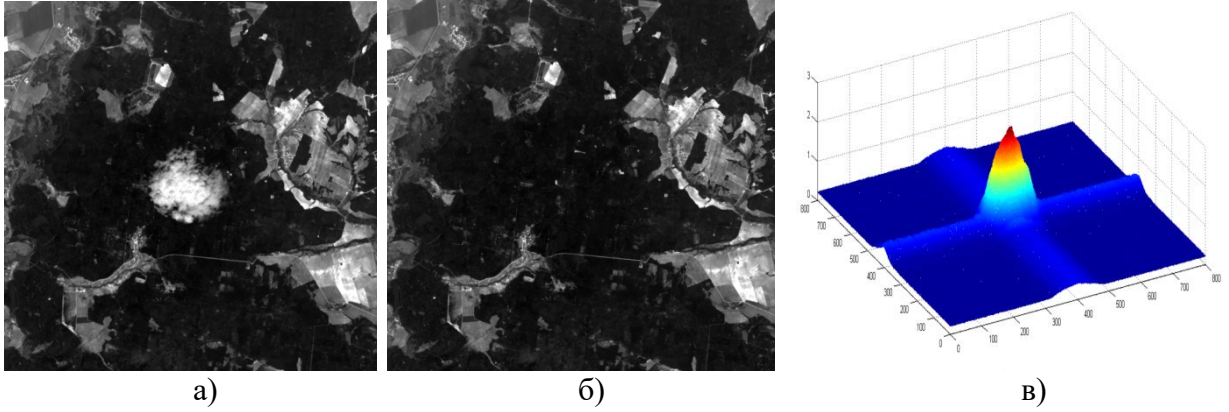


Рисунок 11 – Восстановление МЗИ на базе ДС фильтра

Анализ показывает, что наблюдатель, как правило, не может различить реальное и восстановленное изображения и определить область, которая была скрыта облачностью.

Четвертая глава посвящена синтезу и анализу алгоритмов обнаружения протяженных аномалий на фоне пространственно неоднородных МЗИ. Рассмотрены особенности реализации этих алгоритмов при обработке пространственно неоднородного спутникового материала.

Будем считать, что объект заведомо отсутствует на $(T - 1)$ -м МЗИ во временной последовательности, но может присутствовать на T -м изображении. Также будем считать, что известна форма и структура детектируемого объекта, определяемая отчетами $f_{i,j}^k$, где (i, j) – пространственные координаты, а k – номер спектрального диапазона, но неизвестен уровень его интенсивности в каждом из спектральных диапазонах s^k , $k = 1, \dots, N$, а также фактический угол поворота объекта φ , его масштаб μ и вектор смещения геометрического центра $\bar{\Delta} = (\Delta_x, \Delta_y)^T$. Для этого случая модель наблюдений при наличии полезного сигнала (гипотеза H_1) запишем в виде:

$$z_{i,j}^{k,T} = x_{i,j}^{k,T} + F(s^k f_{i,j}^k, \Delta_x, \Delta_y, \varphi, \mu) + \theta_{i,j}^{k,T}, k = 1, 2, \dots, N, (i, j) \in G_{F_0}^{k,T}, \quad (13)$$

где $\tilde{G}_0^{k,T} = F(G_0^{k,T}, \Delta_x, \Delta_y, \varphi, \mu)$ – область, которую занимает эталонный объект при его смещении на Δ_x и Δ_y по пространственным координатам, повороте на угол φ и изменении масштаба в μ раз; $F(\cdot)$ – аффинное преобразование.

Тогда, используя метод модифицированного отношения правдоподобия и аппроксимируя апостериорное распределение наблюдений гауссовским, получим следующее правило обнаружения:

$$L = \max_{\Delta_x, \Delta_y, \alpha, \mu} \left(\sum_{k=1}^N \sum_{i,j \in \tilde{G}_k} f_{i,j}^k \hat{s}^k \tilde{f}_{i,j}^k \Delta_{i,j}^k \right) \begin{cases} > L_0 - \text{сигнал есть,} \\ < L_0 - \text{сигнала нет.} \end{cases} \quad (14)$$

где $\tilde{f}_{i,j}^k = F(f_{i,j}^k, \Delta_x, \Delta_y, \alpha, \mu)$; $\Delta_{i,j}^k = \sum_{k=1}^N \sum_{i,j \in \tilde{G}_k} V_{\theta_{i,j}}^{k-1} (z_{i,j}^k - x_{i,j}^k)$, а уровни $\hat{s}^k$ можно определить из системы линейных уравнений:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i,j \in \tilde{G}_k} \tilde{f}_{i,j}^t \sum_{l,v \in \tilde{G}_k} V_{\theta_{i,j,l,v}}^{-1} \tilde{f}_{l,v}^k = \sum_{k=1}^N \sum_{i,j \in \tilde{G}_k} \tilde{f}_{i,j}^t \sum_{l,v \in \tilde{G}_k} V_{\theta_{i,j,l,v}}^{-1} (z_{ij}^k - \hat{x}_{ij}^k), t = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

Важной особенностью решающего правила (14) является тот факт, что процесс обработки может быть представлен двумя этапами. Первый этап связан с проведением фильтрации последовательности МЗИ и получением оценок $\Delta_{i,j}^k$. На втором этапе выполняется построение статистики (14) и определение значений параметров $\bar{\alpha} = \{\Delta_x, \Delta_y, \alpha, \mu\}$.

С учетом пространственной неоднородности реального спутникового материала на первом этапе целесообразно использовать процедуры описанной ранее ДС фильтрации. Действительно на рисунке 12 показаны примеры зашумленных изображений, содержащих точечные объекты, результаты ДС фильтрации и характеристики обнаружения, полученные с использованием алгоритма на базе ДС модели (слева) и алгоритма на базе АР моделей (сверху).

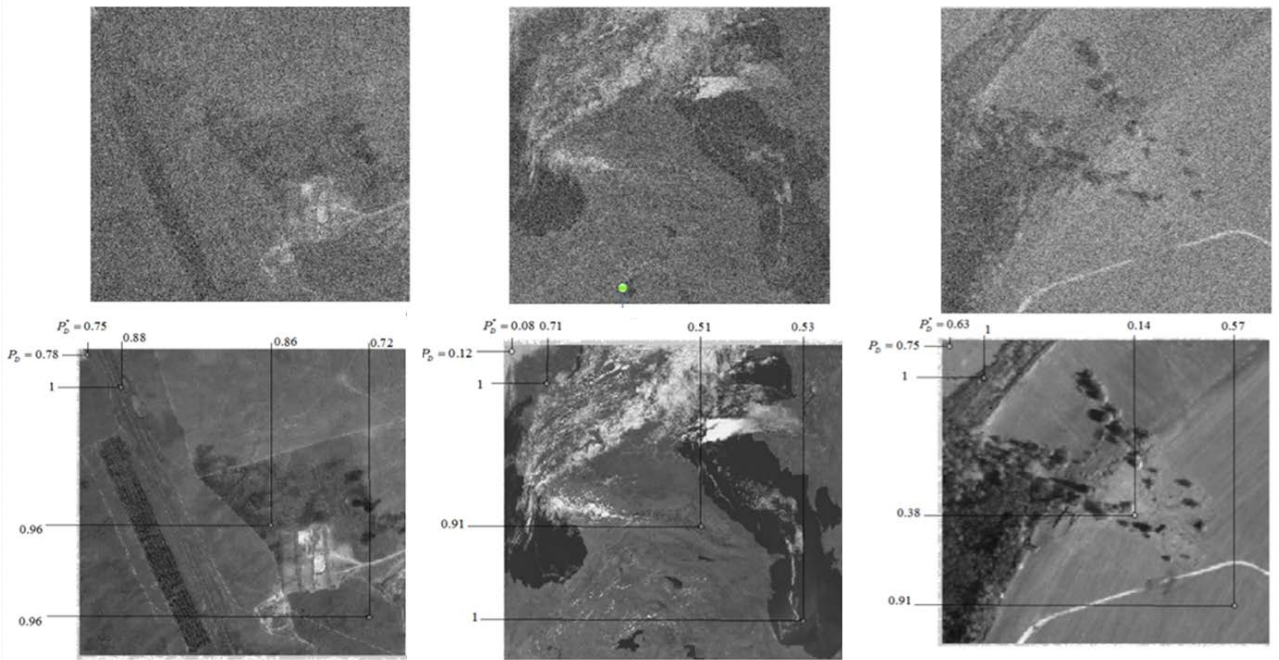
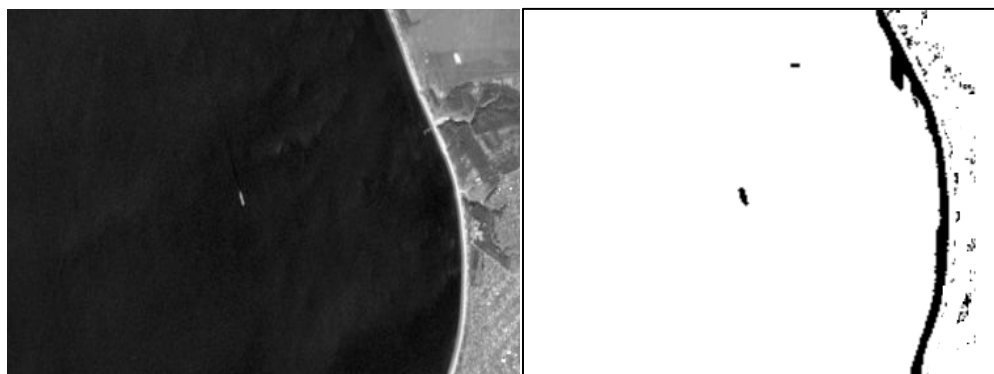


Рисунок 12 – Зашумленные (сверху) и отфильтрованные изображения (снизу)

Анализ показывает, что алгоритм фильтрации на базе ДС моделей в большинстве случаев обеспечивает лучшие характеристики, чем обнаружитель на базе АР моделей. Это объясняется тем, что ДС фильтр позволяет оценивать процесс изменения параметров модели.

В рамках второго этапа задачу обнаружения можно интерпретировать как задачу идентификации изображений объектов по шаблону, которая в свою очередь может быть сведена к поиску пространственного преобразования, которое минимизирует расстояние между искомым изображением и шаблоном в заданном метрическом пространстве. Одним из методов, реализующим такой подход является метод ПГ идентификации, при котором параметры $\bar{\alpha}$ ищутся рекуррентно при неизменном положении шаблона.

Для иллюстрации на рисунке 13 приведен фрагмент спутникового изображения бассейна реки Волга, полученного с космического аппарата Landsat 8 в видимом спектральном диапазоне (2 канал), и разницу между этим фрагментом и результатом совместной ДС фильтрации этих наблюдений и двух предшествующих по времени многозональных изображений (рисунок 13б). Для удобства отображения изображение на рисунке 13б было подвергнуто процедуре подавления белого шума и растягивания гистограммы.



а)

б)

Рисунок 13 – Пример спутникового снимка и соответствующего изображения $\tilde{z}_{i,j}^k$

На рисунке 14 представлен отдельный искусственный кадр многозонального изображения, полученный наложением на исходный снимок областей, выделенных на этапе анализа спектрального рассогласования.

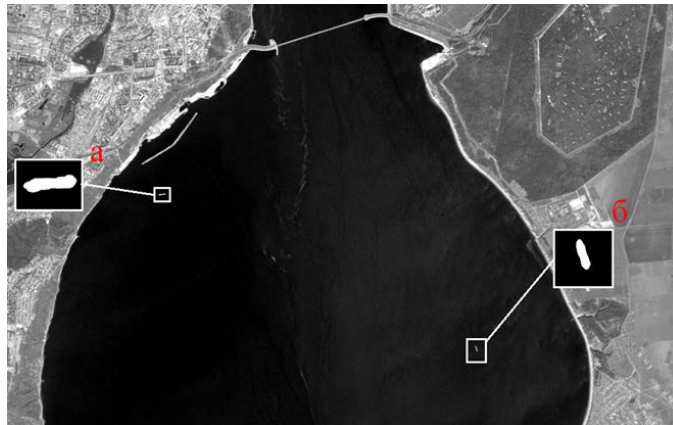


Рисунок 14 – Выделенные области на фоне исходного снимка

В результате идентификации исследуемых объектов «а» и «б» ПГ методом были получены следующие значения. Объект «а» является плавательным средством типа «Баржа» (корреляция 95,9%) с азимутом направления -17^0 . Объект «б» является плавательным средством типа «Сухогруз» (корреляция 91,4%) с азимутом направления 74^0 .

Для оценки количественных характеристик эффективности предлагаемого алгоритма рассмотрим ситуации, которые могут произойти при обнаружении объекта «а». В первой ситуации будем предполагать, что известны все параметры детектируемого объекта $\bar{\alpha} = \{\Delta_x, \Delta_y, \varphi, \mu\}$ за исключением уровней его яркостей s^k . Во второй ситуации будем считать, что

имеющаяся информация относительно угла поворота объекта φ неверна. Для определенности положим, что истинное значение φ и его используемая оценка различаются на 90° . В третьей ситуации будем предполагать, что оценки $\hat{\Delta}_x, \hat{\Delta}_y$ отличаются от истинных значений на 3 пикселя каждый.

На рисунке 15 приведены зависимости вероятности правильного обнаружения от среднего коэффициента яркости объекта на всех кадрах многозонального изображения для указанных ситуаций при использовании алгоритма (14). Во всех случаях вероятность ложной тревоги $P_F = 0.0001$.

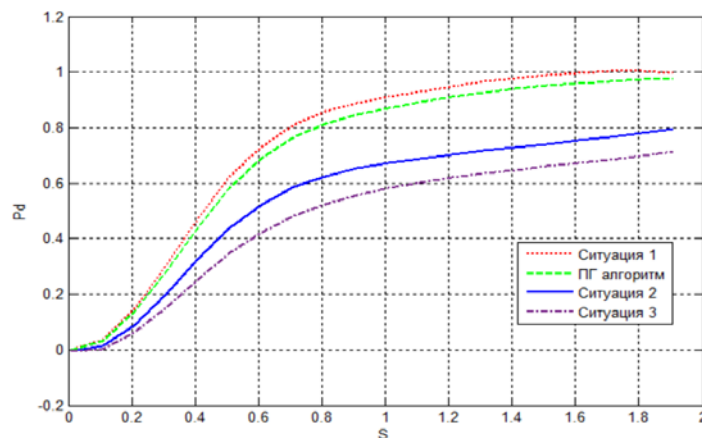


Рисунок 15 – Сравнение эффективности алгоритмов обнаружения в разных ситуациях

Полученные результаты свидетельствуют о близости характеристик синтезированного обнаружителя (14), действующего в условиях априорной неопределенности относительно вектора параметров $\bar{\alpha} = \{\Delta_x, \Delta_y, \varphi, \mu\}$, и оптимального обнаружителя, в ситуации, когда информация о параметрах $\bar{\alpha}$ априорно известна. В случае если часть этой информации оказывается неизвестной или неверной, то алгоритм (14) является более предпочтительным. Так, при вероятности правильного обнаружения $P_d = 0.5$ в случае неверной информации относительно угла поворота и центра объекта выигрыш по уровню полезного сигнала у обнаружителя (14) составил примерно 73%.

С помощью статистического моделирования были проведены численные расчеты эффективности алгоритма обнаружения протяженных аномалий на фоне последовательности МЗИ. На их основе можно сделать вывод, что с увеличением числа кадров во временной последовательности вероятность правильного обнаружения увеличивается. Таким образом, представляется возможным выбрать необходимое количество кадров наблюдаемой сцены, обеспечивающее заданные характеристики эффективности обнаружения.

Пятая глава посвящена разработке алгоритмического и программного обеспечения для реализации и оценки эффективности использования смешанных моделей СП в задачах обработки изображений.

В ходе выполнения работ в рамках диссертационного исследования были разработаны несколько программных комплексов, которые условно могут быть разделены на следующие компоненты:

- скрипт-приложения MATLAB, реализующие найденные алгоритмы обработки изображений;

- сервисные программы, предназначенные для решения узкоспециализированных задач;
- Windows-приложения, позволяющие производить автоматизированное получение данных, осуществлять их единообразное хранение и последующую обработку.
- WEB приложения, позволяющие осуществлять публикацию накопленных данных и результатов их обработки.

Данные программные комплексы, а также математические модели и численные методы, полученные в настоящем исследовании, использовались при решении следующих практических задач:

1. Разработка системы регионального спутникового мониторинга Ульяновской области

Работы по разработке алгоритмов обработки спутниковых изображений и созданию региональной системы спутникового мониторинга проводились при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области. Фактическая реализация проекта выполнялась на базе Интернет-ресурса ГИС «Геопортал» (<http://geo.ulgov.ru/>), предназначенного для предоставления данных дистанционного зондирования Земли, пространственных данных и метаданных Ульяновской области органам государственной и муниципальной власти, а также юридическим и физическим лицам.

Реализация ГИС «Геопортал» связана с проведением предварительного статистического анализа поступающего спутникового материала. В ходе этого анализа выполняется оценка качества спутникового изображения, производится его привязка к географическим координатам, осуществляется сегментация МЗИ и идентификация выявленных на нем объектов. Для этого используется вариант модификации сверточной нейронной сети UNET с полносвязными слоями (FCN), в котором входной слой сети (состоящий по умолчанию из спектральных слоев многозонального изображения) был расширен несколькими вспомогательными двумерными полутонными изображениями, полученными из исходного с помощью преобразований NDVI, EVI, SAVI, оценками, полученными с помощью ДС фильтрацией, и двумя двумерными массивами, представляющими собой результаты сегментации данной территории в предыдущий момент времени и один год назад. Анализ качества такого алгоритма показал точность обработки, сравнимую с результатами работы квалифицированного оператора.

В качестве иллюстрации такой методики на рисунке 16 представлены серии фрагментов спутниковых изображений лесного массива в Чердаклинском районе Ульяновской области за период 2001-2017 гг. и изображений разреза Милановского на берегу р. Волга в северной части г. Ульяновска за период 2013-2017 гг. При этом для удобства восприятия и получения цветного изображения выполнено совмещение видимых спектральных диапазонов и наложение фрагмента сегментированного изображения и нормалей к контролируемому объекту. В первом случае количество обрабатываемых МЗИ составило 42 снимка, во втором 32 снимка. Минимальный временной интервал получения спутниковой информации – 14 дней.

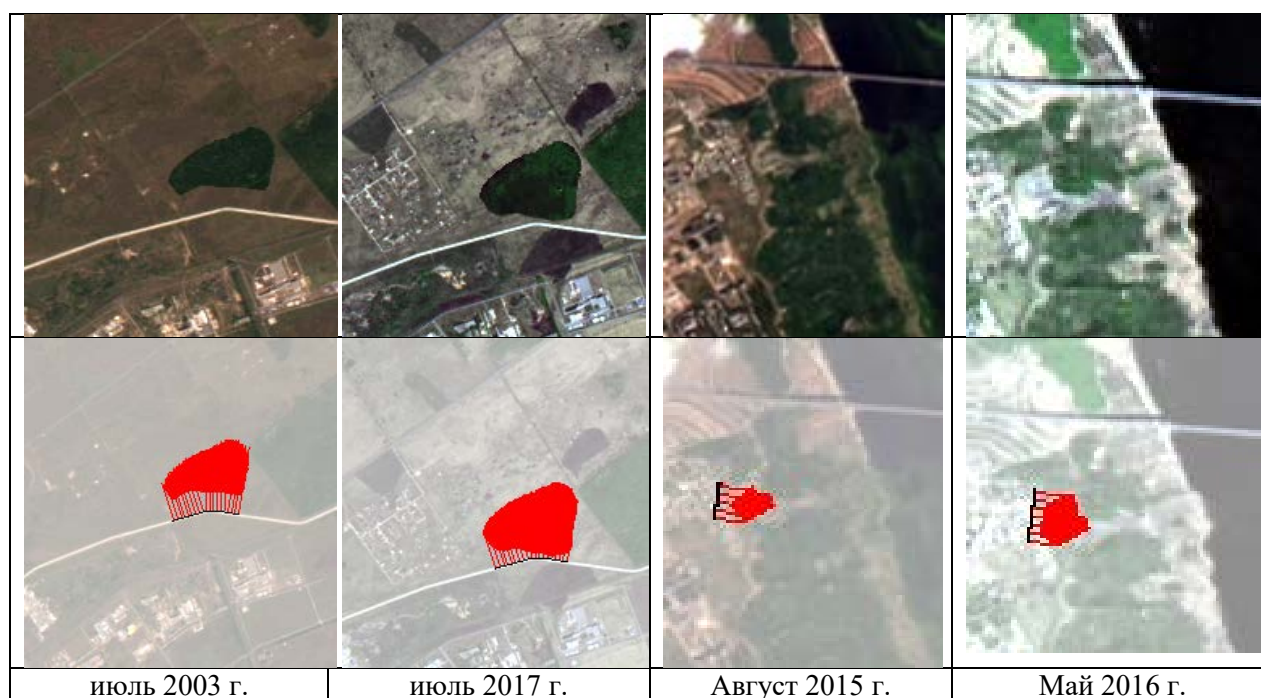


Рисунок 16 – Фрагменты спутниковых изображений

Указанные группы МЗИ были разделены на обучающую и рабочую выборки. Обучающие выборки использовались для оценки параметров. Рабочая часть была обработана тремя алгоритмами, позволяющими выполнять прогноз расстояний по предыдущим наблюдениям. Первый алгоритм (I) состоит в построении простого линейного прогноза по двум предшествующим наблюдениям. Второй (II) и третий (III) предполагают построение экстраполированного прогноза по результатам калмановской фильтрации и ДС фильтрации наблюдений. В таблице 3 представлены зависимости средних ошибок прогнозирования от вида объекта и времени съемки.

Таблица 3 – Зависимости средних ошибок прогнозирования от вида объекта и времени съемки

Наименование снимка	Средняя ошибка алгоритма I	Средняя ошибка алгоритма II	Средняя ошибка алгоритма III
Снимок разреза Милановского. Май 2014 г.	7.1 м.	3.8 м.	3.6 м.
Снимок разреза Милановского. Май 2015 г.	7.3 м.	3.9 м.	3.8 м.
Снимок разреза Милановского. Май 2016 г.	6.9 м.	3.9 м.	3.7 м.
Снимок разреза Милановского. Апрель 2016 г. Начало оползневых процессов.	12.4 м.	8.9 м.	7.8 м.
Снимок разреза Милановского. Апрель 2016 г. Продолжение оползневых процессов.	30.7 м.	32.8 м.	12.6 м.
Снимок разреза Милановского. Май 2016 г. Прекращение оползневых процессов	20.3 м.	18.1 м.	17.3 м.

В среднем ДС фильтр обеспечивает точность прогноза на 6% выше, чем в случае использования калмановского фильтра и на 58% выше, чем в случае простых линейных прогнозов. При этом очень важно, что ДС фильтр позволяет

быстрее реагировать на резкое изменение скорости процессов. В качестве иллюстрации приведем поведение оценок расстояния от разреза до одной из контролируемых точек (рисунок 17а) и оценки параметра $\hat{a}_i^t$ (рисунок 17б).

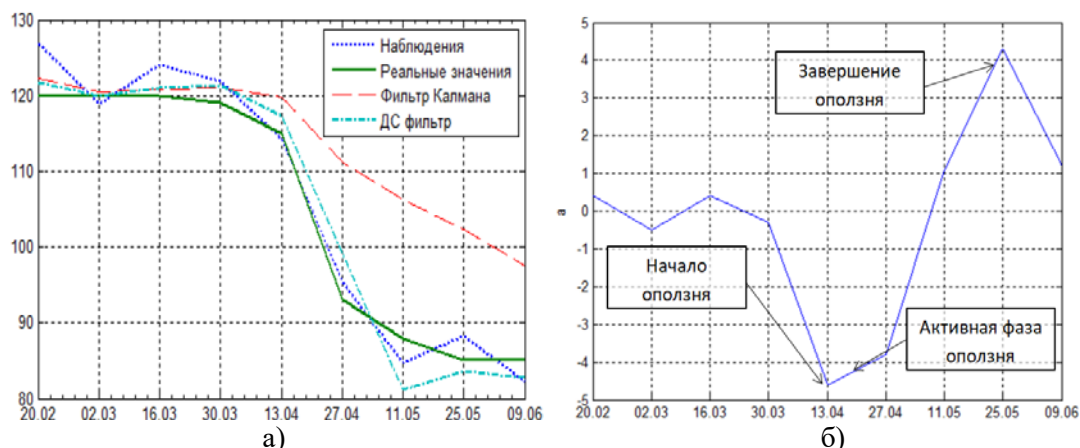


Рисунок 17 – Зависимость результатов фильтрации от времени съемки

Анализ приведенных результатов в сравнении с данными объективного контроля (сплошная линия) свидетельствует о превосходстве ДС фильтра по точности фильтрации над калмановским фильтром. Оно наиболее ярко проявляется в случае резкого изменения скорости протекания обрушения породы. Это изменение соответствует скачку оценки параметра $\hat{a}_i^t$, что позволяет по характеру зависимости этой оценки от времени съемки судить о значительных изменениях в состоянии области разреза.

2. *Разработка аппаратно-программной платформы и алгоритмов навигации и управления беспилотным летательным аппаратом.*

Данный проект был реализован в рамках договоров с ФНПЦ АО «НПО «Марс» и при поддержке РФФИ. В ходе реализации проекта была разработана мобильная платформа на базе двух микрокомпьютеров Nvidia Jetson TX1, объединенных в вычислительный кластер. С вычислительной платформой сопряжены GPS/ГЛОНАСС приемник, две независимых инерциальных навигационных системы (ИНС), 6 лазерных дальномеров, пространственный инфракрасный дальномер и 2 бортовых видеокамеры высокого разрешения. Данная платформа была установлена на беспилотном летательном аппарате, собранном на базе рамы Tarot 910 и бортового контроллера NAZA-MV2.

Было показано, что совместная обработка данных инерциальных навигационных систем, а также видеопоследовательности подстилающей поверхности позволяет решать задачу позиционирования БПЛА даже в условиях отсутствия сигнала спутниковой системы навигации на основе последовательного совмещения изображений окружающих объектов. Также была решена задача обнаружения и сопровождения компактных движущихся объектов с использованием пространственных дальномеров. Особую важность решение этой задачи приобретает в случае, если заданный объект закамуфлирован и не может быть идентифицирован по результатам обработки обычных оптических фотоснимков. Для этого предложено использовать комбинации ДС фильтров и предложенных обнаружителей. При этом для

сокращения вычислительных затрат использовалась ДС модель с сокращенным векторным представлением. Использование такого подхода вместе с упрощенным расчетом матрицы усиления фильтра позволило обеспечить обработку изображений на одиночном микрокомпьютере Nvidia Jetson TX1 в течении 0.3-0.4 секунд, при проигрыше оптимальному алгоритму в среднем в 6% по величине вероятности правильного обнаружения. С учетом того, что получаемую временную последовательность изображений с пространственного дальногомера можно считать совмещенной, то нелинейную фильтрацию возможно производить не для каждого вновь поступающего кадра, а только для области, отсутствующей на предыдущем кадре. Это позволяет обеспечить обработку непосредственно на борту летательного аппарата в режиме реального времени.

3. Разработка технологии мониторинга качества услуг сетей сотовой подвижной связи.

Данный проект связан с задачей построения актуальных карт покрытия сети сотовой подвижной связи и использования этих карт для оптимизации работы сотового оператора. Предложено выполнять адаптацию коэффициентов моделей распространения радиосигнала по результатам частных измерений для каждой отдельной области, параметры сети в которой отличаются относительным постоянством. Показано, что каждой такой области усредненная модель распространения сигнала может быть выражена следующей формулой:

$$P_k(i, j) = A_k - B_k \ln(r(i, j)) + C_k(i, j), \quad (16)$$

где $P_k(i, j)$ ожидаемый уровень сигнала в точке (i, j) , принадлежащей k -ой области; $r(i, j)$ – расстояние между базовой станцией и мобильным аппаратом, расположенным в точке (i, j) ; $C_k(i, j)$ представляет собой СП с нулевым математическим ожиданием и медленно меняющимися корреляционными свойствами, позволяющее компенсировать невязку между фактическими измерениями и прогнозом. Для описания $C_k(i, j)$ предложено использовать одномерную ДС модель. Тогда фактические измерения радиопокрытия можно использовать для идентификации параметров ДС модели в соответствии с методикой, описанной в настоящей работе. В результате проведенной идентификации каждой из k последовательностей измерений будут поставлены в соответствие ряд параметров ДС модели. Данные параметры позволяют получить дополнительное представление об особенностях распространения радиосигнала в пределах k -й области и могут быть использованы как значимые характеристики при разбиении всех измерений на отдельные «квазиоднородные» области.

На рисунке 18 в качестве иллюстрации приведены фрагмент электронной карты местности с нанесенными измерениями (рисунок 18а), разбиение этой территории на отдельные области по результатам «наращивания» окрестностей вдоль измерений (рисунок 18б), уровень сигнала от отдельной базовой станции (рисунок 18в).

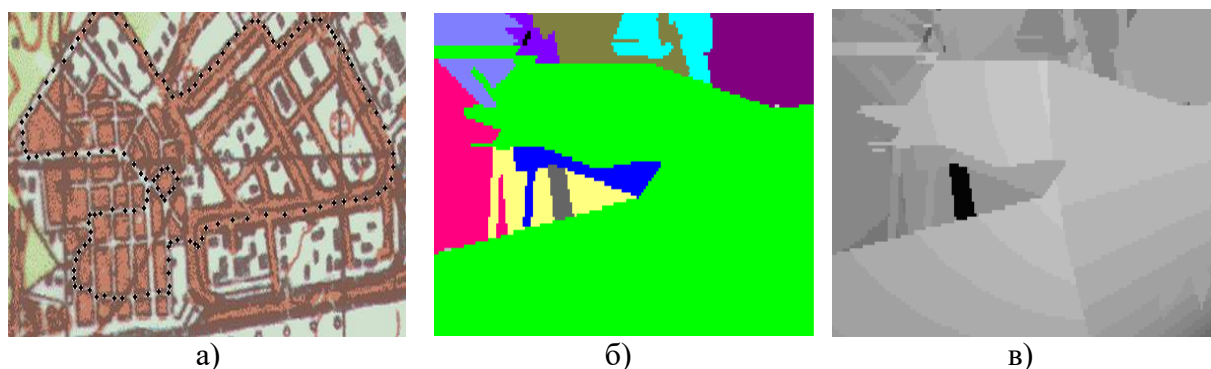


Рисунок 18 – Результаты объездов (а), автоматическое разделение территории на набор непересекающихся областей (б) и прогноз уровня сигнала (в)

На рисунке 19 представлены результаты расчёта покрытия для г. Ульяновска (а) и отдельного микрорайона (б).

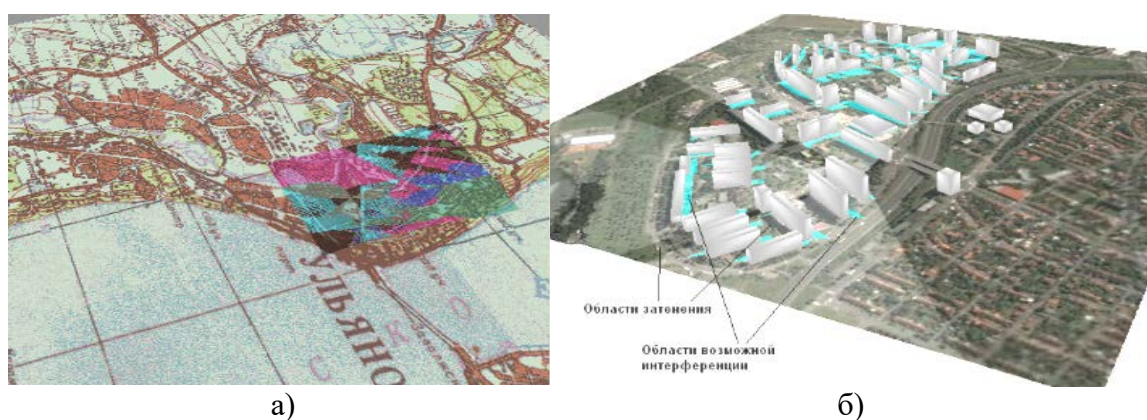


Рисунок 19 – Результаты расчета покрытия

Преимущество предлагаемой модели наиболее ярко проявляется при исследовании распространения поля в городских условиях. Это можно объяснить выраженной зональной застройкой городской территории, когда один квартал города может быть плотно застроен высотными зданиями, а другой представлять собой лесопарковую зону.

Таким образом, предложенные в диссертационной работе и реализованные в программном комплексе, алгоритмы моделирования, оценивания и фильтрации СП, обнаружения сигналов на многомерных изображениях могут найти применение в различных прикладных областях.

Подтверждением возможности применения найденных моделей и алгоритмов являются акты о внедрения результатов диссертационной работы, выданные ФНПЦ АО «НПО «Марс», ОГКУ «Правительство для граждан» Ульяновской области и ООО «АйПиТелеком».

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1. Анализ известных подходов к моделированию многомерных сигналов показал отсутствие универсального способа формирования СП с изменяющимися вероятностными характеристиками. Выявлено большое количество вариантов описания многомерных сигналов, основными

недостатками которых являются отсутствие удовлетворительного решения задачи адекватного описания пространственно-неоднородных изображений и их последовательностей, анизотропный характер имитируемых СП и значительные трудности при синтезе алгоритмов обработки, основанных на математических моделях негауссовских сигналов.

2. Для разрешения выявленной проблемы предложено использование ДС моделей, основанных на комбинациях многомерных АР моделей. Показано, что предложенные математические модели позволяют имитировать пространственно неоднородные изображения и нестационарные во времени сигналы при незначительном увеличении вычислительных затрат в сравнении с моделями, описывающими пространственно однородный материал. Разработан математический аппарат, позволяющий описать вероятностные свойства ДС моделей. Выявлен класс ДС моделей, построенных на базе АР моделей с кратными корнями, обеспечивающих квазиизотропность имитируемых изображений.

3. Для решения задачи идентификации параметров многомерной ДС модели по реальным изображениям предложен метод, основанный на комбинации модифицированного ЕМ алгоритма и численной безыдентификационной ПГ адаптации. Показана состоятельность этого метода и установлены количественные характеристики его эффективности при оценивании параметров ДС модели. Установлено, что данный подход позволяет получить изображения, близкие к заданным по своим статистическим и корреляционным свойствам.

4. На основе разработанного математического аппарата идентификации локальных корреляционных свойств изображений и байесовского подхода предложен метод нелинейной ДС фильтрации. Синтезировано несколько классов ДС фильтров, позволяющих производить обработку двумерных пространственно неоднородных изображений, МЗИ и их временных последовательностей, в том числе на вычислительных системах с параллельной архитектурой. Показано, что по сравнению с классическими линейными фильтрами и известными нелинейными алгоритмами применение ДС фильтров позволяет до 2 раз снизить дисперсию ошибки фильтрации.

5. Исследование предложенных процедур ДС фильтрации показало, что результатом такой фильтрации является не только совокупность оценок обрабатываемого изображения, но и оценки параметров внутренних формирующих СП. Такая особенность позволяет использовать ДС фильтры не только для компенсации шума, но и при решении других задач обработки изображений, в частности в качестве составляющей алгоритмов текстурно-корреляционного анализа и сегментации изображений. Приведенные в работе результаты показывают, что использование в алгоритмах сегментации ДС фильтрации позволяет повысить число верно соотнесенных элементов на 10-15%. С использованием двухпроходной ДС фильтрации предложены также способы выявления границ объектов на изображении и восстановления поврежденных участков изображения.

6. Предложен и исследован новый метод обнаружения объектов на многомерных изображениях, использующий предварительную ДС фильтрацию этих изображений. Установлено, что для пространственно неоднородных изображений применение ДС фильтра в этом случае позволяет получить выигрыш 2-5 дБ по уровню объекта в сравнении с обнаружителем, предполагающим линейную оценку в область возможного положения объекта.

7. Разработано семейство алгоритмов обнаружения, предполагающих априорную неизвестность относительно координат объекта, его масштаба, угла поворота и относительных уровней яркости на фоне временных последовательностей МЗИ. Показаны преимущества использования таких алгоритмов при решении задач, связанных с обнаружением объектов на фоне реального спутникового материала.

8. Разработан ряд алгоритмов ДС фильтрации результатов тематического картографирования временных последовательностей спутниковых изображений, направленных на повышение точности определения границ между идентифицированными объектами, прогноза их динамики, в том числе выявления моментов изменения скорости процессов, определяющих состояние объектов.

9. Создан пакет программ, реализующих разработанные алгоритмы моделирования и обработки многомерных изображений, исследования их адекватности и эффективности, в том числе на основе статистического моделирования. Разработанное программное обеспечение использовано при решении ряда прикладных задач обработки последовательностей многомерных изображений: при обработке данных ДЗЗ, при навигации и позиционировании автономного роботизированного аппарата, анализе данных (параметров) качества услуг сетей сотовой подвижной связи и других. Кроме того, предложено использование программных комплексов для исследования базовых процедур обработки изображений в учебных целях.

10. Разработанные ДС модели и методы анализа и обработки изображений на их основе в дальнейшем могут быть обобщены на случай временных последовательностей коррелированных спектрозональных и иных многомерных изображений, содержащих существенно различающиеся по своим вероятностными характеристикам объекты.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях.

В научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Дементьев, В.Е. Обнаружение протяженных аномалий на многозональных изображениях / В.Е. Дементьев, К.К. Васильев // Наукоемкие технологии. – 2007. – №9. – С. 3-14.

2. Dementev, V.E. Using methods of image processing for describing and optimizing the network coverage of mobile connections / V.E. Dementev, A.N. Repin, G.L. Minkina // Pattern Recognition and Image Analysis: Applied Problems. – 2009. – Vol 19. – No.1. – P. 84-88.

3. Дементьев, В.Е. Способ определения плотности пористых структур с

использованием методов обработки визуальной информации / В.Е. Дементьев, В.Н. Кокорин, А.С. Марков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 11. – №3(2). – 2009. – С. 369-372.

4. Дементьев, В.Е. Реализация процедуры мягкого декодирования блоковых кодов методом кластерного анализа / В.Е. Дементьев, Д.А. Капустин, А.А. Гладких, В.В. Воронин // Успехи современной радиоэлектроники. – №9. – 2011. – С. 30-36.

5. Дементьев, В.Е. Алгоритмы деанонимизации абонентов в сети Интернет / В.Е. Дементьев, А.Ю. Пуцев // Радиосистемы. Математическое моделирование инфокоммуникационных систем. – №1. – 2012. – С. 27-30.

6. Дементьев, В.Е. Обнаружение протяженных сигналов на многозональных изображениях / В.Е. Дементьев, К.К. Васильев, Н.В. Лучков // Радиосистемы. Математическое моделирование инфокоммуникационных систем. – №1. – 2012. – С. 35-40.

7. Dementev, V.E. Analysis of Efficiency of Detecting Extended Signals of Multidimensional Grids / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.V. Luchkov // Pattern Recognition and Image Analysis: Applied Problems. – 2013. – Vol.23. – No.1. – P. 1-10.

8. Дементьев, В.Е. Авторегрессионные модели многомерных изображений / В.Е. Дементьев, К.К. Васильев // Научные технологии. – 2013. – Т. 14. – №15. – С. 12-15.

9. Дементьев, В.Е. Оценивание параметров дважды стохастических случайных полей / В.Е. Дементьев, К.К. Васильев, Н.А. Андриянов // Радиотехника. – 2014. – №7. – С. 103-106.

10. Дементьев, В.Е. Разработка алгоритмов навигации автономных летательных аппаратов с использованием методов обработки изображений / В.Е. Дементьев, С.В. Воронов // Радиотехника. – 2014. – №11. – С. 82-85.

11. Dementev, V.E. Doubly stochastic models of images / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2015. – Vol. 25. – №1. – P. 105-110.

12. Дементьев, В.Е. Анализ эффективности оценивания изменяющихся параметров дважды стохастической модели / К.К. Васильев, В.Е. Дементьев, Н.А. Андриянов // Радиотехника. – 2015. – №6. – С. 12-15.

13. Дементьев, В.Е. Разработка алгоритмов навигации беспилотного летательного аппарата на основе цифровой обработки изображений / В.Е. Дементьев, А.Г. Френкель // Радиотехника. – 2015. – №6. – С. 16-19.

14. Дементьев, В.Е. Исследование точности обнаружения и распознавания сигналов простейших геометрических форм на фоне дважды стохастических изображений / К.К. Васильев, В.Е. Дементьев, Н.А. Андриянов // Вопросы радиоэлектроники. – №6 (23). – 2015. – С. 67-71.

15. Dementev, V.E. Application of mixed models for solving the problems on restoring and estimating image parameters / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). – 2016. – Т. 26. – №1. – С. 240-248.

16. Дементьев, В.Е. Обнаружение протяженных сигналов на фоне дважды стохастических изображений / В.Е. Дементьев, К.К. Васильев,

Н.А. Андриянов // Радиотехника. – 2016. – №9. – С. 23-27.

17. Дементьев, В.Е. Разработка и анализ алгоритмов оценивания траектории автономных летательных аппаратов по результатам обработки изображений окружающих объектов / В.Е. Дементьев, Х.А. Абдулкадим, А.Г. Френкель // Радиотехника. – 2016. – №9. – С. 28-31.

18. Дементьев, В.Е. Анализ эффективности оценивания изменяющихся параметров дважды стохастической модели / В.Е. Дементьев, К.К. Васильев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – №4. – С. 133-139.

19. Дементьев, В.Е. Алгоритмы оценивания координат летательных аппаратов с помощью пространственных дальномеров / В.Е. Дементьев, Х.А. Абдулкадим // Автоматизация процессов управления. – 2017. – №1. – С. 51-57.

20. Дементьев, В.Е. Применение дважды стохастических авторегрессионных моделей для обработки спутниковых изображений / В.Е. Дементьев // Радиотехника. – 2017. – №6. – С. 18-22.

21. Дементьев, В.Е. Метод тематического картографирования последовательностей спутниковых изображений / В.Е. Дементьев, Д.С. Кондратьев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – Т. 15. – №12. – С. 49-53.

22. Дементьев, В.Е. Обнаружение мобильных объектов на изображениях подстилающей поверхности, наблюдаемых с помощью летательных аппаратов / В.Е. Дементьев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 15. – №12. – С. 44-48.

23. Дементьев, В.Е. Особенности разработки и реализации региональной системы спутникового мониторинга / В.Е. Дементьев, К.К. Васильев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 15. – №12. – С. 39-43.

24. Дементьев, В.Е. Обработка пространственно-неоднородных изображений с помощью дважды стохастического фильтра / В.Е. Дементьев // Радиотехника. – 2018. – №6. – С. 24-28.

25. Дементьев, В.Е. Применение сверточных нейронных сетей для тематического картографирования последовательностей спутниковых многозональных изображений / В.Е. Дементьев, Д.С. Кондратьев, А.Г. Френкель // Радиотехника. – 2018. – №6. – С. 29-32.

26. Дементьев, В.Е. О связи между каузальным и некаузальным прогнозом при оценивании многомерных случайных полей / В.Е. Дементьев // Вестник нижегородского государственного инженерно-экономического университета. – 2018. – №10. – С. 5-12.

27. Дементьев, В.Е. Двухэтапное некаузальное оценивание пространственно неоднородных изображений / В.Е. Дементьев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16. – №11. – С. 47-50.

28. Дементьев, В.Е. Повышение эффективности обнаружения радиолокационных целей с использованием данных дистанционного зондирования / В.Е. Дементьев, Д.С. Кондратьев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16. – №11. – С. 51-56.

29. Дементьев, В.Е. Разработка системы навигации беспилотного летательного аппарата / В.Е. Дементьев, А.Г. Френкель // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – т.16. – №11. – С. 61-65.

30. Dementiev, V.E. Developing and studying the algorithm for segmentation of simple images using detectors based on doubly stochastic random fields / Dementiev V.E., Andriyanov N.A. // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2019. – V. 29. – №1. – P. 1-9.

31. Dementiev, V. E. Developing a filtering algorithm for doubly stochastic images based on models with multiple roots of characteristic equations / V. E. Dementiev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2019. – V. 29. – №1. – P. 10-20.

В монографии

32. Дементьев, В.Е. Представление и обработка спутниковых многозональных изображений / К.К. Васильев, В.Е. Дементьев. – Ульяновск, 2017. – 247 с.

В реферируемых журналах и изданиях, индексируемых реферативными базами данных Web of Science / Scopus:

33. Dementev, V.E. The extended anomalies detection with unknown on the polyzonal images sequences / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev // Proceedings of the 8th International Conference on Pattern recognition and image analysis. – 2007. – Vol. 2. – p. 372-374.

34. Dementev, V.E. Detection effectiveness analysis for elongated signals on multidimensional grids / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.V. Luchkov // Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition and Image analysis. – 2010. – Vol.1. – P.371-373.

35. Dementev, V.E. Scene features extraction for moving vehicle position estimation improvent / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, M.N. Slyzhivyi // Proceedings of the 8-th Open German-Russian Workshop "Pattern Recognition and Image Understandig". – 2011. – Vol.1. – P. 311-314.

36. Dementev, V.E. Application of mixed models to solve the problems of restoration and estimation of image parameters / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // Proceedings of the 9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding, Koblenz, Germany. – 2014. – P. 38-42.

37. Dementev, V.E. The using of bluetooth technologies for communication with territorial-distributed devices / V.E. Dementev and etc. // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – № 1. – vol. 9247. – P. 518 – 528.

38. Dementev, V. E. Anomalies detection on spatially inhomogeneous polyzonal images / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1901. – P. 10-15.

39. Dementev, V. E. Filtration and restoration of satellite images using doubly stochastic random fields / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1814. – P. 10-20.

40. Dementev, V. E. Development of the filtering algorithm for doubly stochastic images based on models with multiple roots of characteristic equations /

V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // Proceedings of the international Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018), Montréal, Canada. – 2018. – P. 643-647.

41. Dementev, V. E. Filtration and restoration of satellite images using doubly stochastic random fields / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov //CEUR Workshop Proceedings. –2018. – Vol. 2076. – P. 19-28.

42. Dementev, V. E. Topology, protocols and databases in Bluetooth 4.0 sensor networks / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev // Proceedings of the Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – 2018. – P. 1-7.

43. Dementev, V. E. Representation and processing of multispectral satellite images and sequences / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // Procedia Computer Science. – 2018. –Vol. 126. – P. 49-58.

44. Dementev, V. E. Application of mixed models of random fields for the segmentation of satellite images / V.E. Dementev, K.K. Andriyanov //CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 1814. – P. 10-20.

45. Dementev, V. E. Analysis of the efficiency of satellite image sequences filtering / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol.1096. – 7p.

46. Dementev, V. E. Investigation of the filtering and objects detection algorithms for a multizone image sequence / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, N.A. Andriyanov // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2019. – Vol. XLII-2/W12. – p. 7-10.

47. Dementev, V.E. Applying doubly stochastic filters to evaluate the dynamics of object sizes on satellite image sequences / V.E. Dementev, D.S. Kondratiev // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2391. – P. 54-59.

48. Dementev, V.E. The use of image processing algorithms to solve the problem of navigation of unmanned aerial vehicles / D.V. Ganin, V.E. Dementev, K.K. Vasiliev // Journal of Mechatronics, Automation and Identification Technology, Belgrade. –2019. – Vol. 4. – Issue 3. – P. 14-19.

49. Dementev, V.E. Determination of borders between objects on satellite images using atwo-proof doubly stochastic filtration / V. E. Dementev, N. A. Andriyanov //Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1353 (HIRM-2019). – 6p.

50. Dementev, V.E. Thematic mapping and evaluation of temporary sequence of multi-zone satellite images. / V.E. Dementev, A.G. Frenkel, D.S. Kondratiev, A.S. Streltsova // Proceedings of the Seventeenth Russian Conference on Artificial Intelligence (RCAI-2019). – 2019. – vol. 1093. – P. 81-92.

51. Dementev, V.E. Detection and identification of objects on multispectral satellite images / V. E. Dementev, R. G. Magdeev and A. G. Tashlinskii //Journal of Physics: Conference Series). – 2019. – vol. 1368 (Image Processing and Earth Remote Sensing). – 6p.

52. Dementev, V.E. Using probabilistic statistics to determine the parameters of doubly stochastic models based on autoregression with multiple roots /K. K. Vasiliev, V. E. Dementev, N. A. Andriyanov //Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – vol. 1368 (Image Processing and Earth Remote Sensing). – 7p.

53. Dementev, V.E. Computer Vision in Advanced Control Systems. Advanced Decisions in Technical and Medical Applications. / V.E. Dementev, K.K. Vasiliev, V.R. Krashenninnikov. – KES International, Shoreham-by-Sea, UK. – 2019. –Р. 53-97.

Патенты и свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ

54. Патент на полезную модель 65333 Российская Федерация, МПК7 H04Q 9/00. Мобильный измерительный терминал сетей сотовой подвижной связи. / В.Е. Дементьев, А.Г. Ташлинский, В.Б. Ефимов, С.В. Елягин; заявитель и патентообладатель ООО "В.ЕФ телеком" (RU). – № 65333; заявл.24.04.2006; опубл.27.07.2007, Бюл. № 21. – 3 с.

55. Патент на полезную модель 91787 Российская Федерация, МПК7 H04Q 9/00. Мобильный терминал контроля транспортного средства. / Дементьев В.Е., Елягин С.В.; заявитель и патентообладатель Дементьев В.Е., Елягин С.В. (RU). – № 91787; заявл.26.10.2009; опубл.27.02.2010, Бюл. №6. –3 с.

56. Патент 2540937 Российская Федерация, МПК G01S 15/00. Гидролокационный способ обнаружения подвижных объектов с движущейся подводной платформы / К.К. Васильев, В.Е. Дементьев и др.; заявитель и патентообладатель ФНПЦ ОАО "НПО "Марс" (RU). – № 2540937; заявл. 12.09.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. – 3 с.

57. Свид. 2006612050 Российская Федерация. Цифровая обработка и моделирование авторегрессионных и дважды стохастических случайных полей / Н.А. Андриянов, К.К. Васильев, В.Е. Дементьев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО УлГТУ (RU). – №2006612050; заявл. 04.04.2016; опубл. 18.06.2016, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

58. Свид. 2018618141 Российская Федерация. Программа имитации авторегрессионных случайных полей / Н.А. Андриянов, К.К. Васильев, В.Е. Дементьев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО УлГТУ (RU). – №2018618141; заявл.06.05.2018; опубл.10.07.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

59. Патент 2702079 Российская Федерация, МПК H04W 84/18. Способ снижения энергопотребления сенсорных узлов в беспроводной сенсорной сети. / В.Е. Дементьев, С.В. Елягин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО УлГТУ (RU). – № 2702079; заявл.31.05.2018; опубл.03.10.2019, Бюл. № 28.– 5 с.

60. Свид. 2019664005 Российская Федерация. Стохастическая многопозиционная модуляция цифровых последовательностей / Н.А. Андриянов, В.Е. Дементьев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО УлГТУ (RU). – №2019664005; заявл. 14.10.2019; опубл. 29.10.2019, Реестр программ для ЭВМ. –1 с.

61. Свид. 2019662665 Российская Федерация. Программа представления и анализа свойств изображений на базе моделей с изменяющимися параметрами / Н.А. Андриянов, В.Е. Дементьев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО УлГТУ (RU). – № 2019662665; заявл. 14.10.2019; опубл. 29.10.2019, Реестр программ для ЭВМ. –1 с.