

На правах рукописи



ПРОНЬКИН АНТОН ВИКТОРОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ С НИЗКОЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТЬЮ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМА И
ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГРАНИЦ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 2.3.8. Информатика и информационные процессы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань, 2025

Работа выполнена на кафедре «Электронные вычислительные машины» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Научный Новиков Анатолий Иванович

руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ЭВМ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», г. Рязань.

Официальные Николаев Дмитрий Петрович

оппоненты: доктор технических наук, доцент, руководитель отдела 95 «Зрительные системы» Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва.

Якименко Игорь Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроника и микропроцессорная техника» Филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" в г. Смоленске.

Ведущая

организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль.

Защита состоится 22.12.2025 года в 11 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 99.2.113.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1 (ауд. 235).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», на сайте <http://rsreu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент



А.Н. Колесенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время системы технического зрения (СТЗ) с различной степенью автоматизации процессов обработки изображений и уровнем решения интеллектуальных задач широко используются в современной жизни. С развитием систем технического зрения поиск новых и модификация существующих алгоритмов, с целью уменьшения вычислительной сложности и повышения качества обработки, остается актуальной задачей. Современные летательные аппараты (ЛА) невозможно представить без бортовых СТЗ, выполняющих широкий спектр задач. Как правило, на ЛА установлен набор сенсоров, которые способны снимать сигналы в разных спектральных диапазонах и на основе результатов их обработки уведомлять экипаж о состоянии судна, корректировать курс, «подсвечивать» опасные участки, дополнять реальное изображение (РИ) виртуальным изображением (ВИ), синтезированным по цифровой карте местности, в условиях плохой видимости.

Обилие количества информации, получаемой с датчиков, и необходимость учитывать достаточно большой набор факторов, влияющих на получаемый результат, требуют высокой производительности от бортового вычислителя, мощности которого ограничены. Разработка современных высокоуровневых алгоритмов для улучшения качества результатов и добавление новых сенсоров способствуют еще большей необходимости в вычислительных ресурсах. Одновременно с этим, качество работы высокоуровневых алгоритмов напрямую зависит от результатов и времени обработки низкоуровневых алгоритмов – методов предварительной обработки изображений.

Неотъемлемой частью СТЗ летательных аппаратов, робототехнических комплексов на подвижной платформе и многих других СТЗ, обеспечивающих обработку потоков видеоинформации в реальном времени являются подсистемы предварительной обработки изображений.

Задача подавления шума является одной из основных в подсистемах предварительной обработки изображений. Наиболее типичным для цифровых изображений является дискретный белый шум. Способы фильтрации такого шума хорошо изучены. На сглаживающие операторы (фильтры), которые призваны подавлять шумовую составляющую изображения, налагаются противоречивые требования: с одной стороны, используемый метод фильтрации шума должен в максимальной степени подавлять шум, с другой – в минимальной степени размывать границы резких перепадов яркости. Еще одно ограничение, налагаемое на используемый метод фильтрации шума, заключается в минимизации вычислительных затрат на его реализацию.

Линейные фильтры имеют низкую вычислительную сложность, обеспечивая при этом хороший уровень подавления шума, однако они одновременно размывают границы перепада яркостей. Нелинейные фильтры

типа сигма-фильтра и билатерального фильтра позволяют сохранять без размытия границы перепада яркостей. Достигается такой результат при правильной настройке параметров фильтра, корректная установка которых возможна только при условии наличия сведений о мощности дискретного шума в составе обрабатываемого изображения. Поэтому задачи оценивания мощности дискретного белого шума в составе изображения, разработки методов адаптивной фильтрации шума, в зависимости от дисперсии шума являются **актуальными задачами**.

Периодический шум не столь типичен для цифровых изображений в отличие, например, от импульсных помех и, тем более, дискретного белого шума, однако его влияние может существенно исказить результаты работы алгоритмов более высокого уровня. В известных алгоритмах фильтрации периодического шума построение маски сглаживания выполняется с участием оператора, а реализации автоматических методов, как правило, имеют высокую вычислительную сложность, что затрудняет их использование в реальных СТЗ с ограниченными ресурсами. Задача построения полностью автоматического метода фильтрации периодического шума, имеющего низкую вычислительную сложность, также является **актуальной**.

Еще одним важным шагом, входящим в подсистему предварительной обработки изображений, является этап детектирования границ перепада яркостей. Контурное изображение содержит существенно меньше активных пикселей по сравнению с растровым изображением, из которого оно было получено, при этом на контурном изображении сохраняется основная информация об объектах интереса. На первый план выступают два основных требования к применяемому методу детектирования границ перепада яркостей: выделение без искажения всех важных контурных линий и минимизация машинного времени на выполнение процедуры детектирования границ. Выполнение первого требования обеспечивают многие известные методы детектирования границ, лучшим из них вполне обоснованно считается градиентный метод Кенни. Однако и он не является идеальным, поэтому построение более эффективного метода как по качеству формируемого контурного изображения, так и по вычислительной сложности является **актуальной задачей**.

Задача разработки новых или модификации известных методов фильтрации дискретного белого шума, периодического шума, а также детектирования границ перепада яркостей на растровом изображении, имеющих низкую вычислительную сложность и не уступающих лучшим аналогам по качественным и количественным характеристикам, является достаточно сложной. Ответ на поставленную задачу автор искал в работах предшественников. Отметим важный вклад в развитие методов цифровой обработки изображений и, в частности, методов предварительной обработки отечественных ученых: Журавлева Ю.И., Желтова С.Ю., Зубарева Ю.Б.,

Киричука В.С., Сойфера В.А., Сергеева В.В., Николаева Д.П. и других. Отдельно нужно отметить важную роль в разработке методов машинной обработки аэрокосмических изображений Алпатова Б.А., Визильтера Ю.В., Еремеева В.В., Кузнецова А. Е. Необходимо отметить также вклад и зарубежных ученых: Гонзалес Р., Понс Ж., Прэтт У., Форсайт Д., Кенни Д., Харалик Р.

Объект исследования – модули предварительной обработки изображений в системах технического зрения реального времени.

Предметом исследования выступают методы и алгоритмы с низкой вычислительной сложностью фильтрации дискретного белого шума, периодических помех, оценивания дисперсии шума в составе изображения и детектирования границ перепада яркости.

Цель работы – разработка новых и модификация известных методов фильтрации шума и детектирования границ изображений, обладающих низкой вычислительной сложностью и имеющих качественные и количественные показатели, не уступающие лучшим аналогам.

Задачи исследования:

1. Выполнить обзор существующих методов и алгоритмов подавления дискретного белого шума, периодических помех, оценивания мощности шума и детектирования границ перепада яркостей на изображении;
2. Разработать новые или модифицировать существующие методы и алгоритмы:
 - фильтрации дискретного белого шума и периодических помех,
 - оценивания СКО шума,
 - детектирования границ;
3. Выполнить экспериментальные исследования предлагаемых методов и алгоритмов и оценить достижение заявленных качественных и количественных показателей в сравнении с известными аналогами;
4. Разработать программные комплексы, реализующие предлагаемые алгоритмы;
5. Оценить возможность применения предлагаемых методов и алгоритмов в системах технического зрения реального времени.

Методы исследования

В работе использовались методы цифровой обработки изображений, линейной алгебры и математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, методы оптимизации, численные методы.

При разработке программных модулей применялись парадигмы процедурного, объектно-ориентированного и функционального программирования, концепции асинхронного и параллельного программирования, подходы обобщенного и визуального программирования.

Научная новизна исследования:

1. Разработан метод оценивания дисперсии дискретного белого шума на основе разностных операторов с векторными масками, отличающийся от

известных методов большей точностью – точнее на 8-10%, и низкой вычислительной сложностью – быстрее аналогов в 5-12 раз.

2. Предложена модификация алгоритмов линейной и нелинейной фильтрации дискретного белого шума, основанная на использовании апостериорной оценки дисперсии шума в составе цифрового изображения по методу, предложенному в пункте 1, позволяющая обеспечивать заданный уровень подавления шума, с низкой вычислительной сложностью.
3. Разработан градиентный метод детектирования границ, основанный на применении векторных масок для получения сглаженных оценок частных производных, и использующий оригинальный способ вычисления верхнего и нижнего порогов для формирования «сильных» и «слабых» линий; предложенные решения позволили в 10-50 раз сократить число коротких, неинформативных линий и в 2,5-3 раза сократить время обработки одного кадра по сравнению с одним из лучших градиентных методов – методом Кенни.
4. Разработан алгоритм локализации областей в окрестности локальных максимумов амплитудного спектра с использованием разработанного автором детектора границ, позволивший выполнять фильтрацию периодического шума без участия оператора в автоматическом режиме.

Соответствие паспорту научной специальности

Область исследования соответствует пунктам паспорта специальности:

Пункт 1. Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения.

Пункт 4. Разработка методов и технологий цифровой обработки аудиовизуальной информации с целью обнаружения закономерностей в данных, включая обработку текстовых и иных изображений, видео контента. Разработка методов и моделей распознавания, понимания и синтеза речи, принципов и методов извлечения требуемой информации из текстов.

Пункт 17. Разработка методов обеспечения надежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации; разработка основ теории надежности и безопасности использования информационных технологий.

Теоретическая значимость

При решении задач цифровой обработки изображений, вопреки сложившейся практике использования матричных масок, были применены операторы с векторными масками, весовые коэффициенты которых находятся как оптимальные оценки метода наименьших квадратов (МНК). На этой базе предложены новые методы и алгоритмы оценивания мощности

дискретного белого шума в составе цифрового изображения, детектирования границ перепада яркостей на растровом изображении, фильтрации периодического шума.

Практическая значимость

Предлагаемые методы разработаны в виде программных модулей, которые могут быть использованы в конвейере задач реальных СТЗ. Практическое использование разработанных модулей в организациях, занимающихся разработкой систем технического зрения для использования на различных объектах, подтвердило достижение заявленных характеристик.

Реализация и внедрение результатов работы.

Разработанные методы и алгоритмы внедрены:

- в ООО «Квантрон Групп» (г. Рязань) в состав программно-аппаратного комплекса дефектоскопии РЕТ-преформ;
- в АО «РИФ» (г. Воронеж) при разработке прицела оптико-электронного для гранатомета РПГ-29 и оптико-электронной системы наблюдения;
- в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по специальностям 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», дисциплина «Теория информации и цифровая обработка сигналов» (программа магистратуры); и 27.05.01 «Специальные организационно-технические системы», дисциплина «Видеокомпьютерные технологии в специальных организационно-технических системах»;
- в учебный процесс кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ» для подготовки бакалавров и магистров по направлениям 09.03.02 и 09.04.02 «Информационные системы и технологии» при проведении лекций и выполнения лабораторных работ по дисциплинам «Цифровая обработка изображений и «Модели информационных процессов и систем»;

Достоверность положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректным использованием математических моделей и методов, соответствием известным данным и работам других авторов, подтверждением результатами экспериментальных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод оценивания дисперсии дискретного белого шума на основе разностных операторов с векторными масками, отличающийся от известных методов большей точностью – точнее на 8-10%, и низкой вычислительной сложностью – быстрее аналогов в 5-12 раз.
2. Модификация алгоритмов линейной и нелинейной фильтрации дискретного белого шума, основанная на использовании апостериорной оценки дисперсии шума в составе цифрового изображения по методу,

изложенному в пункте 1, позволяющая обеспечивать заданный уровень подавления шума.

3. Градиентный метод детектирования границ, основанный на применении векторных масок для получения сглаженных оценок частных производных, и использующий оригинальный способ вычисления верхнего и нижнего порогов для формирования «сильных» и «слабых» линий; предложенные решения обеспечивают сокращение в 2,5-3 раза время обработки одного кадра и в 10-50 раз уменьшение числа коротких, неинформативных линий по сравнению с одним из лучших градиентных методов – методом Кенни.
4. Алгоритм локализации областей в окрестности локальных максимумов амплитудного спектра с использованием разработанного автором детектора границ, позволивший выполнять фильтрацию периодического шума без участия оператора в автоматическом режиме.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на 14 международных и всероссийских научно-технических конференциях: 6-ой, 7-ой, 9-ой международной конференции и молодежной школы "Информационные технологии и нанотехнологии" (Самара, 2020, 2021, 2023); 8-ой, 9-ой средиземноморской конференции по встроенным вычислениям МЕСО (Будва, 2019, 2020); международном научно-техническом форуме «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2018, 2024); 23-ей, 26-ой всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2018, 2021); 14-ой международной научно-технической конференции Распознавание (Курск, 2018); 2-ой всероссийской конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Естественнонаучные основы медико-биологических знаний» (Рязань, 2019); международном конгрессе «Современные проблемы компьютерных и информационных наук» (Москва, 2020); 24-ой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2022); 32-ой международной конференции по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения ГрафиКон-2022 (Рязань, 2022).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для защиты диссертаций, 5 статей с индексированием в базах Scopus и Web of Science, 3 работы на платформе IEEE Xplore, соавтор монографии «Методы цифровой обработки изображений подстилающей поверхности» (главы 1-4), в которой изложены основные результаты диссертационного исследования, получена государственная регистрация 2 программ для ЭВМ

Личный вклад автора

Все результаты диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Постановка задач и обсуждение полученных результатов на различных этапах исследования проводились совместно с научным руководителем.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертационного исследования обосновывается актуальность выбранной темы, анализируется степень ее изученности в научной литературе, формулируются цели и задачи работы. Определяются объект и предмет исследования, раскрывается его научная новизна, а также методологическая база, обосновываются теоретическая и практическая значимость полученных результатов и формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** произведен обзор методов предварительной обработки изображений: фильтрации дискретного белого шума, периодических помех, оценивания мощности шума в составе изображения и детектирования границ перепада яркости.

Представлены линейные (равномерный, гауссов, степени двойки, полиномиальный) и нелинейные (сигма-фильтр, медианный, симметричный билатеральный) сглаживающие фильтры, проведен сравнительный анализ по сглаживающим характеристикам. Показано, что линейные фильтры хорошо подавляют шум, но при увеличении размеров матричной маски размывают границы объектов интереса. Нелинейные операторы способны учитывать локальные особенности изображений, однако качество фильтрации напрямую зависит от правильности подбора входных параметров, которые, как правило, определяются значением мощности шума в составе изображения. В частности, равномерный сглаживающий оператор обладает наилучшими сглаживающими характеристиками, особенно для изображений с высоким порогом среднеквадратического отклонения шума (СКО), однако для больших размеров масок оператора фильтр размывает изображение, что затрудняет дальнейший анализ. С другой стороны, нелинейный сигма-фильтр имеет низкую вычислительную сложность, сохраняет границы перепадов яркости, однако порог отсекается зависит от дисперсии шума и точность ее оценки напрямую влияет на качество сглаживания.

Аналогично сглаживающим операторам подавления дискретного белого шума рассмотрены методы фильтрации периодических помех, которые не столь типичны на цифровых изображениях, но наличие которых может существенно усложнить анализ. Рассмотрен общий подход к фильтрации периодического шума, приведены примеры существующих методов построения масок сглаживания и алгоритмов поиска окрестностей локальных максимумов на амплитудном спектре (секториальные маски, кластеризация

RFPCM, построение «звездных» масок в окрестностях локальных максимумов, режекторный фильтр на основе статистики)

Рассмотрена задача оценивания дисперсии шума в составе изображения и ее приложения. Проведен обзор существующих методов, подробно описан блочный метод оценивания СКО шума с использованием разностного оператора, который имеет точные оценки при невысокой вычислительной сложности, по сравнению с методами, оперирующими спектральными характеристиками изображения. Приведены примеры результатов обработки и показаны зависимости точности оценок от выбранного параметра, определяющего размер блоков.

Описана постановка задачи детектирования границ, отмечена ее нетривиальность, приведена классификация методов создания контурных изображений. Подробно описаны шаги градиентного метода Кенни, который признан лучшим по качеству детектирования границ. Рассмотрены примеры результатов детектирования границ популярными методами (Собеля, Превитта, Робинсона, Кирша, Лапласиан, Кенни).

В конце первого раздела осуществлена постановка задач исследования на основе рассмотренных проблем методов предварительной обработки изображений и заявленной цели исследования.

Второй раздел посвящен методам и алгоритмам оценивания уровня шума в составе изображения на основе векторных масок, имеющих точные оценки и низкую вычислительную сложность, а также модификации алгоритмов линейной и нелинейной фильтрации с использованием оценки СКО шума в составе изображения.

Предлагаемые методы оценивания СКО шума основаны на достаточно реалистичных предположениях, что в аддитивной модели изображения присутствует некоррелированный дискретный гауссов шум, спектральные характеристики которого остаются постоянными в отдельных фрагментах изображения, в том числе для областей, представляющих собой срез изображения по строке или по столбцу, и что детерминированная по отношению к шуму составляющая в малой окрестности пикселя адекватно описывается алгебраической функцией не выше третьей степени. Рассматривается оператор $A_{\text{полиномиальный}}$ с коэффициентами

$$\alpha_i = \frac{3}{(4k^2 - 1)(2k + 3)} \cdot (3k^2 + 3k - 1 - 5i^2), i = \overline{-k, k},$$

который дает несмещенное оценивание многочленов до третьей степени включительно.

Предлагается блочный алгоритм оценивания СКО шума на основе векторных масок, состоящий из следующих шагов:

1. Исходное изображение разбивается на блоки одинакового размера, в каждом блоке вычисляется дисперсия, выбирается N блоков с минимальными дисперсиями (на практике N равно 4-5).

2. В каждом блоке фиксируются строки с шагом h (шаг может быть равен 1 для анализа всех строк), в которых производится сглаживание разностным оператором $\mathbf{B} = \mathbf{A}_{1 \times 5} - \mathbf{A}_{1 \times 7}$, где в качестве $\mathbf{A}$ используется $A_{\text{полиномиальный}}$ с векторными масками длиной 5 и 7.
3. В фиксированных строках выбранных блоков вычисляются выборочные дисперсии и соответствующие им СКО $\sigma_{\eta}^{(t)}$, $t = \overline{1, N}$, на основе которых определяется среднее СКО $\bar{\sigma}_{\eta} = \left(\sum_{t=1}^N \sigma_{\eta}^{(t)} \right) / N$.
4. Вычисляется искомая оценка СКО шума $\hat{\sigma}_{\xi}$ в составе изображения по формуле $\hat{\sigma}_{\xi} = \frac{\sqrt{105}}{4} \bar{\sigma}_{\eta}$. Коэффициент $\frac{\sqrt{105}}{4}$ справедлив при использовании операторов с размерами масок 1×5 и 1×7 в составе разностного оператора $\mathbf{B}$. При использовании других размеров искомая оценка может быть вычислена по формуле $\hat{\sigma}_{\xi} = \left(\hat{D}[\eta] / \beta_0 \right)^{1/2}$, где $\beta_0 = \sum_{s=-k}^k \beta_s^2$, β_i – коэффициенты разностного оператора $\mathbf{B} = \mathbf{A}_{1 \times 5} - \mathbf{A}_{1 \times 7}$.

Учитывая предположение, что $A_{\text{полиномиальный}}$ дает несмещенное оценивание многочленов до третьей степени включительно, можно сделать вывод, что в областях выполнения предположения оператор при небольшой длине окна скольжения обеспечивает несмещенное оценивание компоненты полезного сигнала, поэтому вычитание результата сглаживания оператором $A_{\text{полиномиальный}}$ из оригинального изображения, позволяет аннулировать низкочастотный сигнал. На основе этого предлагается строчный метод оценивания дисперсии шума, обладающий более низкой вычислительной сложностью при незначительной потере точности оценивания:

1. На изображении фиксируются строки с шагом h (шаг может быть равен 1 для анализа всех строк), каждая строка разбивается на промежутки равной длины L (на практике строка делится на 2-4 части), в каждом из которых вычисляется дисперсия и выбирается N промежутков с минимальной дисперсией.
2. В выбранных промежутках выполняется сглаживание оператором $A_{\text{полиномиальный}}$ и результаты сглаживания вычитаются из оригинального изображения.

3. В выбранных промежутках вычисляются выборочные дисперсии и соответствующие им СКО $\sigma_{\eta}^{(t)}$, $t = \overline{1, N}$, на основе которых определяется среднее СКО $\bar{\sigma}_{\eta} = \left(\sum_{t=1}^N \sigma_{\eta}^{(t)} \right) / N$.
4. Вычисляется искомая оценка СКО шума $\hat{\sigma}_{\xi}$ в составе изображения по формуле $\hat{\sigma}_{\xi} = \sqrt{\frac{35}{18}} \cdot \bar{\sigma}_{\eta}$. Коэффициент $\sqrt{\frac{35}{18}}$ справедлив при использовании оператора $A_{\text{полиномиальный}}$ с маской длины 5. При использовании других размеров масок искомая оценка может быть вычислена по формуле $\hat{D}[\xi] = \frac{1}{1 - \alpha_0} \hat{D}[\eta]$, где $\alpha_0 = \sum_{s=-k}^k \alpha_s^2$, α_i – коэффициенты сглаживающего оператора $A_{\text{полиномиальный}}$.

Второй метод является модификацией метода, предложенного в диссертационной работе Устюкова Д.И. «Методы и алгоритмы обнаружения объектов на аэрокосмических изображениях с применением комплексного контурного анализа» и превосходит последний как по точности оценивания дисперсии, так и по вычислительной сложности алгоритма.

Проводится сравнительный анализ предлагаемых методов (M_1 и M_2) по точности оценок и по вычислительной сложности. Отмечается, что оба предлагаемых метода используют меньше вычислительных ресурсов, по сравнению с аналогами (M_k), причем блочный метод имеет более точные оценки, а второй метод имеет самую низкую вычислительную сложность из рассматриваемых алгоритмов при незначительном снижении точности оценивания СКО шума. Результат обработки серии изображений с наложенным СКО шума $\sigma_{\xi} = 1$ представлен в таблице 1, вычислительные затраты отражены в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты оценивания СКО наложенного шума $\sigma_{\xi} = 1$

Изображение	Оценки $\hat{\sigma}_{\xi}$		
	M_k	M_1	M_2
1	1,30	1,05	0,97
2	1,39	1,07	1,17
3	1,61	0,98	0,95
4	0,97	0,94	1,08
5	0,94	1,00	1,00
6	0,97	1,00	1,12
7	1,14	0,97	1,02
Средняя ошибка	22,3%	3,28%	6,7%

Таблица 2 – Результаты методов по вычислительным затратам

Метод	M_k	M_1		M_2	
		$h=1$	$h=4$	$h=1$	$h=4$
Машинное время, мс	4,03	0,81	0,62	0,69	0,46

Для исследования характеристик предлагаемых методов и встраивания в СТЗ разработаны системы и программный модуль, для которого получено свидетельство о государственной регистрации, результаты исследования методов оценивания уровня шума докладывались на 4 международных конференциях и опубликованы в журнале «Компьютерная оптика».

Рассмотрено приложение предлагаемых методов оценивания СКО шума в задачах линейной и нелинейной фильтрации шума для адаптивного определения размеров матричной маски фильтра в зависимости от задаваемого уровня подавления шума. Уровень подавления шума может задаваться либо в виде числа процентов, на которое должен быть уменьшен шум, либо в виде порога, который не должна превышать дисперсия остаточного шума в составе изображения после выполнения фильтрации. В случае линейных операторов предлагаемый метод оценивания СКО шума используется для определения размера маски сглаживания. Правильно подобранный размер маски и выбор линейного оператора позволяет добиться необходимого сглаживания.

Как известно, в условиях аддитивной модели

$$I_{ij} = U_{ij} + \xi_{ij} \quad \xi_{ij} \in N(0, \sigma^2), i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}$$

с некоррелированным гауссовым шумом ξ для каждого линейного фильтра с матричной маской размера $(2k+1) \times (2k+1)$ справедлива оценка

$$D[\eta] = \left(\sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k \alpha_{ij}^2 \right) \cdot D[\xi]$$

или в терминах СКО

$$\sigma[\eta] = \gamma \cdot \sigma[\xi], \quad (1)$$

где $\gamma = \sqrt{\sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k \alpha_{ij}^2}$ – коэффициент остаточного уровня шума, а $\beta = 1 - \gamma$ – коэффициент подавления шума.

Для каждого линейного фильтра $\mathbf{A}_t, t=1,2,...,m$ с заданным законом изменения коэффициентов α_{ij} его ядра (маски) можно заранее вычислить значения коэффициента γ . Так для равномерного фильтра $A_{\text{равномерный}}^*$, все

коэффициенты матричной маски которого равны $\frac{1}{(2k+1)^2}$, коэффициент γ остаточного уровня шума находится по формуле $\gamma_1 = \frac{1}{2k+1}$.

Для «гауссова» фильтра $A_{гауссов}^*$ с законом изменения коэффициентов матричной маски: $\alpha_{ij} = \lambda \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{k^2}\right)$, $i, j = \overline{-k, k}$, где k – параметр, входящий в размер маски коэффициент γ_2 остаточного уровня шума находится по основной формуле $\gamma_2 = \sqrt{\sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k \alpha_{ij}^2}$.

Для фильтра $A_{степени\ двойки}^*$ с законом изменения коэффициентов матричной маски: $\alpha_{ij} = \frac{1}{(3 \cdot 2^k - 2)} 2^{2k - |i| - |j|}$, $i, j = \overline{-k, k}$ коэффициент γ_3 остаточного уровня шума для оператора A_3 находится по формуле $\gamma_3 = \frac{5 \cdot 4^k - 2}{3(3 \cdot 2^k - 2)^2}$.

Например, при размере маски 5x5 для названных операторов получаем значения коэффициента остаточного уровня шума: $\gamma_1 = 0.2$, $\gamma_2 = 0.23$, $\gamma_3 = 0.26$, а при размере маски 9x9: $\gamma_1 = 0.1$, $\gamma_2 = 0.16$, $\gamma_3 = 0.2$. В диссертации приведены примеры выбора размера маски в зависимости от значения полученной оценки СКО шума и заявленного уровня подавления шума в составе цифрового изображения.

В качестве нелинейного оператора рассматривается модификация сигма-фильтра, использующая вычисленную оценку СКО шума для определения как размера маски, так и порога фильтрации $\Delta = m\hat{\sigma}$ с целью максимального подавления высокочастотных колебаний при сохранении границ перепада яркости. В формуле порога Δ в методе сигма-фильтра значение параметра m принимается равным 2, а $\hat{\sigma}$ – оценка СКО шума в составе обрабатываемого изображения. Приведенные результаты фильтрации подтверждают предположения, пример работы сигма-фильтра с автоматическим определением порога фильтрации с использованием предлагаемого метода M_2 представлен на рисунке 1.

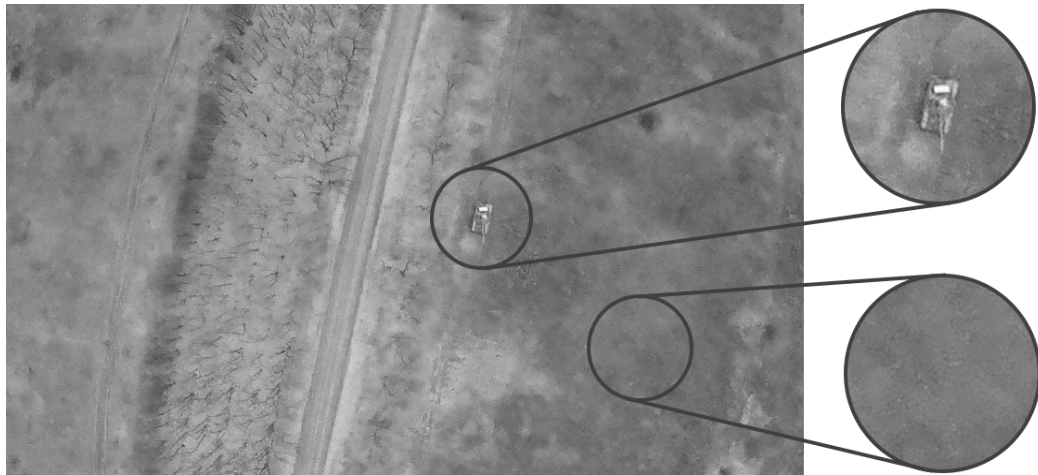


Рисунок 1 – Результат фильтрации сигма-фильтром

В третьем разделе рассматривается метод детектирования границ, использующий для оценки частных производных векторную маску, обладающую сглаживающими свойствами и имеющий качественные и количественные характеристики, не уступающие лучшему аналогу – методу Кенни. Предлагается алгоритм автоматического выбора порогов фильтрации для минимизации неинформативных линий. Рассматривается также приложение детектора границ в задаче фильтрации периодического шума для формирования маски фильтрации.

В методе Кенни используются матричные маски Собеля для нахождения оценок частных производных, при этом предварительно необходимо выполнить сглаживание изображения. В предлагаемом методе используется векторная маска $(-k, -k+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, k-1, k)$, получаемая из МНК-оценки линейной функции и применяемая к срезам изображения по строкам и столбцам. Важно отметить, что предлагаемая маска обладает сглаживающими свойствами, поэтому при небольших значениях СКО шума на изображении можно полностью отказаться от предварительного сглаживания, уменьшив вычислительные затраты.

В рассматриваемом методе, аналогично методу Кенни, используется двойная пороговая фильтрация, однако предлагается исключать из последующего поиска локальных максимумов пиксели, модуль градиента в которых меньше нижнего порога. Подобная оптимизация позволяет исключить около 80% обрабатываемых точек на изображении. Последний шаг аналогичен последнему этапу метода Кенни – слабые «линии» присоединяются к «сильным», либо исключаются из обработки.

Предлагаемый метод имеет близкие по качеству детектирования границ результаты в сравнении с методом Кенни, при этом вычислительная сложность ниже в 2,5-3 раза за счет использования векторной маски, отказа от предварительного сглаживания и применения оптимизации с исключением пикселей, которые заведомо не являются максимумами.

Пример детектирования границ предлагаемым методом в разработанной программе представлен на рисунке 2.

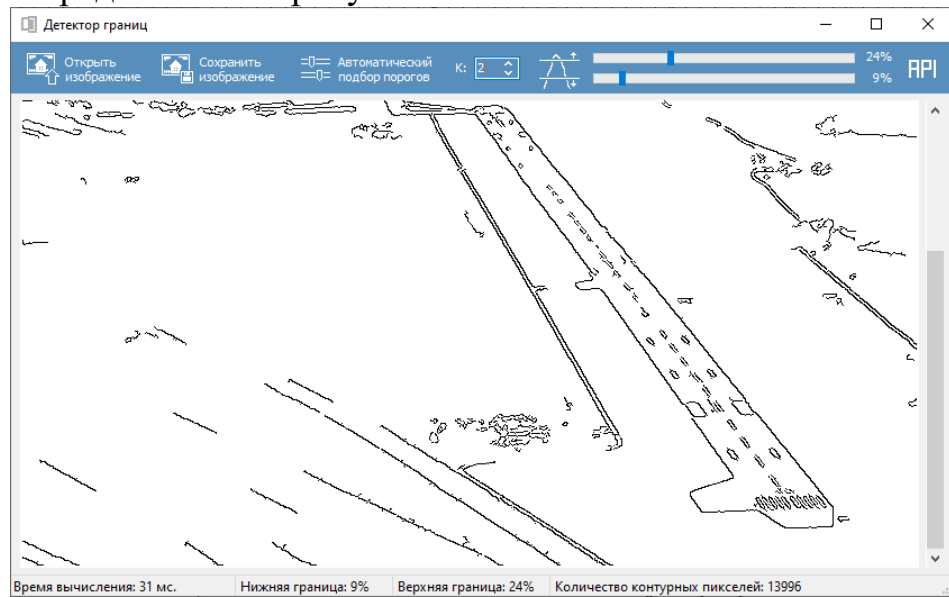


Рисунок 2 – Пример детектирования границ предлагаемым методом.

В дополнение к методу предлагается алгоритм автоматического подбора порогов фильтрации Δ_1 и Δ_2 , основанный на анализе гистограммы модулей градиентов. Предлагаемый алгоритм обеспечивает формирование минимального, но при этом достаточного для решения задач высшего уровня, числа граничных линий в результирующем контурном изображении. Анализируется множество модулей градиентов, и горизонтальная ось разбивается на 100 интервалов. На вертикальной оси отложено количество n_i пикселей со значениями модулей градиентов из соответствующего интервала. Идея определения нижнего порога заключается в нахождении первого интервала, двигаясь в направлении положительного направления горизонтальной оси, в котором выполняется условие $\delta_i = S_i / S_{i-1} < \delta_{грн}$, где S_i – нарастающая сумма $S_i = S_{i-1} + n_i$, $S_0 = 0$. Другими словами, вычисляются нарастающие суммы интервалов гистограммы и относительная величина δ_i для каждого номера i . При достижении некоторого номера i_0 , для которого выполняется условие $\delta_{i_0} < \delta_{грн}$, правый конец интервала определяет нижнюю границу $\Delta_1 = \delta_{i_0}$.

Граничное значение $\delta_{грн} = 1,04$ определено на основе анализа большой серии изображений подстилающей поверхности Земли, фотографий с камер наблюдений и рентгеновских снимков. Оно определяет границу, при котором увеличение порога на 1% добавляет менее 4% граничных пикселей.

Верхний порог фильтрации $\Delta_2 = \lambda_2 |\nabla I|_{\max}$ вычисляется на основе соотношения $\lambda_2 = 3,2 \cdot \lambda_1 \cdot (1 - 2 \cdot \lambda_1)$, полученного на основе статистики при

исследовании детектированных границ большой серии разнородных изображений, учитывая, что $\lambda_1 = \Delta_1 / |\nabla I|_{\max}$. На рисунке 3 изображен пример гистограммы модулей градиентов с нарастающими суммами с подсвеченными интервалами, которые соответствуют порогам фильтрации Δ_1 и Δ_2 .

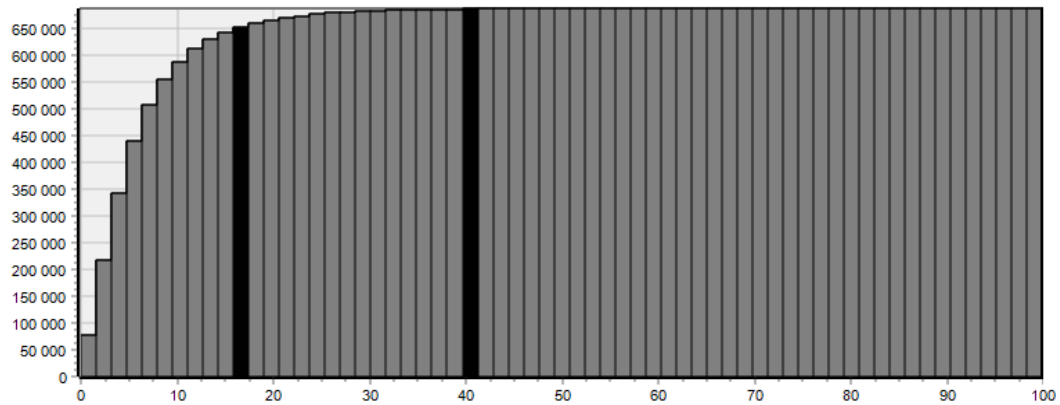


Рисунок 3 – Гистограмма нарастающих сумм модулей градиентов

Диаметрально противоположный методу Кенни способ вычисления и использования нижнего и верхнего порогов – сначала вычисляется нижний порог Δ_1 , а затем по нему вычисляется верхний порог Δ_2 – позволяет существенно сократить количество слабых граничных линий, затрудняющих дальнейший анализ, и одновременно сохранить все сильные линии.

Для описанного метода детектирования границ и предлагаемого алгоритма автоматического определения порогов фильтрации разработаны исследовательские программы и модуль для встраивания в СТЗ, по которому получено свидетельство о государственной регистрации программы, результаты исследования метода и алгоритма докладывались на 9 международных и всероссийских конференциях.

Предлагаемый метод детектирования границ перепада яркостей может использоваться в широком спектре задач. В качестве приложения в **четвертом разделе** диссертации рассматривается задача фильтрации периодического шума в составе изображения. Периодический шум в составе цифрового изображения проявляется в виде периодически следующих белых, серых или черных полос, которые могут быть горизонтальными, вертикальными косыми (левое изображение на рисунке 4). В случае псевдопериодического шума геометрия периодически следующих линий может быть еще более сложной, напоминающей, по определению некоторых авторов, муаровые линии.

Фильтрация периодического шума выполняется с переходом в частотную область в результате применения прямого дискретного преобразования Фурье. На амплитудном спектре периодическому шуму определенной частоты отвечает локальный экстремум (рисунок 5, слева). Для удаления из состава исходного изображения нужно «вырезать» на

амплитудном спектре определенную область в окрестности локального максимума. Основная проблема заключается в определении границ названной области. В диссертации предложен способ использования детектора границ для формирования границ искомой области.

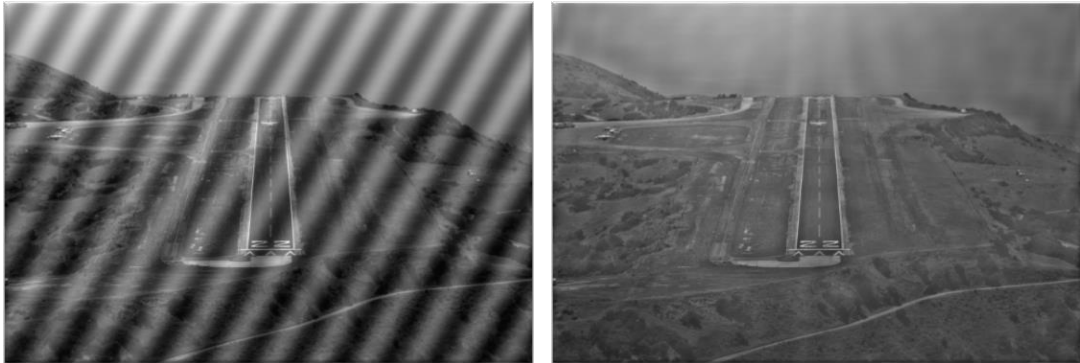


Рисунок 4 – Изображение с периодическим шумом (слева) и результат фильтрации (справа)

Вычислительный алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Выполнение прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ) $f = F(I)$.
2. Формирование маски фильтрации частот на основе предлагаемого детектора границ, применяемого на амплитудном спектре, с последующим применением морфологических операций дилатации и эрозии.
3. Аннулирование коэффициентов частот, соответствующих полученной маске (рисунок 5) $g = G(f)$.
4. Выполнение обратного ДПФ $\hat{I} = F^{-1}(g)$.

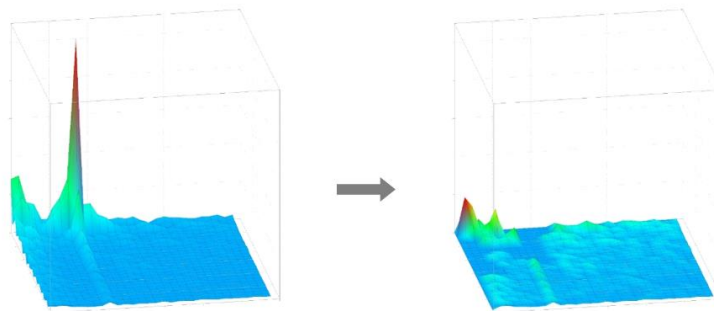


Рисунок 5 – Аннулирование коэффициентов частот

В **заключении** представлены результаты диссертационного исследования, сформулированы ключевые выводы и обобщены результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость в рамках изучаемой темы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках диссертационного исследования:

1. Выполнен обзор существующих методов и алгоритмов подавления дискретного белого шума, периодических помех, оценивания мощности шума и детектирования границ перепада яркостей на изображении.
2. Разработан новый метод оценивания уровня шума, отличающийся от известных методов большей точностью – точнее на 8-10%, и низкой вычислительной сложностью – быстрее аналогов в 5-12 раз. Предложен метод, имеющий еще меньшую вычислительную сложность при несущественной потере точности.
3. Предложена модификация линейных и нелинейных сглаживающих фильтров, основанная на оценке СКО шума, полученной с помощью предлагаемого метода, позволяющая в автоматическом режиме выбирать размер маски сглаживания и параметр фильтрации в сигма-фильтре, зависящий от СКО шума на изображении.
4. Разработан градиентный метод детектирования границ, основанный на применении векторных масок для получения сглаженных оценок частных производных, и использующий оригинальный способ вычисления верхнего и нижнего порогов; предложенные решения обеспечивают сокращение в 2,5-3 раза время обработки одного кадра и в 10-50 раз уменьшение числа коротких, неинформативных линий по сравнению с одним из лучших градиентных методов – методом Кенни.
5. Предложен алгоритм локализации областей в окрестности локальных максимумов амплитудного спектра с использованием разработанного детектора границ, позволяющий выполнять фильтрацию периодического шума без участия оператора в автоматическом режиме.
6. Выполнены экспериментальные исследования предлагаемых методов и алгоритмов и проведен сравнительный анализ.
7. Разработаны программные комплексы и самостоятельные модули, реализующие предлагаемые алгоритмы.
8. Предложенные в диссертации методы и алгоритмы внедрены в производство, где практически подтвердили надежность функционирования и заявленные характеристики. Как отмечается в акте внедрения ООО «Квантрон»: использование результатов диссертации обеспечивает повышение качества детектирования границ РЕТ-преформ; обнаружение дефектов РЕТ-преформ уже на этапе предобработки; автоматическое формирование признака необходимости выполнения очистки рабочей поверхности инспекционного стола.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Сравнительный анализ методов фильтрации дискретного гауссовского шума при обработке изображений / А. И. Новиков, А. В. Пронькин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 66-1. – DOI 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-70-77.
2. Детектор границ градиентного типа для изображений подстилающей поверхности / А. И. Новиков, А. В. Пронькин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 68. – С. 68-76. – DOI 10.21667/1995-4565-2019-68-2-68-76.
3. Быстрые алгоритмы первичной обработки изображений в бортовых системах технического зрения / А. И. Новиков, А. В. Пронькин, Д. И. Устюков // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2020. – Т. 16. – № 3. – С. 673-685. – DOI 10.25559/SITITO.16.202003.673-685.
4. Метод оценки уровня шума цифрового изображения / А. И. Новиков, А. В. Пронькин // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45. – № 5. – С. 713-720. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-894.
5. Частотный метод фильтрации периодических помех цифровых изображений / А. И. Новиков, А. В. Пронькин, Н. О. Шамин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 78. – С. 130-141. – DOI 10.21667/1995-4565-2021-78-130-141.
6. Линейные операторы с векторными масками в задачах цифровой обработки изображений / А. И. Новиков, А. В. Пронькин // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 4. – С. 596-604. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-1241. – EDN RKXXPQ.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web Of Science

7. New Method to Detect Edges in Underlying Surface Images / A. I. Novikov, A. V. Pronkin // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019 - Proceedings : 8, Budva, 10–14 июня 2019 года. – Budva, 2019. – P. 8760000. – DOI 10.1109/MECO.2019.8760000.
8. Methods for Suppressing Discrete White Noise in Images / D. I. Ustyukov, A. V. Pronkin, E. R. Muratov, A. I. Novikov // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020 : 9, Budva. – Budva, 2020. – P. 9134131. – DOI 10.1109/MECO49872.2020.913413.
9. Edge Detector Application in the Problem of Periodic Interference Filtering / A. Novikov, A. Pronkin, S. Vityazev // 2022 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications, DSPA 2022 : 24, Moscow, 30 марта – 01 2022 года. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/DSPA53304.2022.9790763.

Монографии

10. Методы цифровой обработки изображений подстилающей поверхности. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 224 с. ISBN 978-5-9912-1045-4.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019664622 Российская Федерация. Программа детектирования границ перепада яркости на изображениях разных спектральных диапазонов: №2019663686: заявл. 29.10.2019: опубл. 11.11.2019 / А. В. Пронькин, А. И. Новиков.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022615608 Российская Федерация. Программа оценивания уровня дискретного белого шума в составе изображения: №2022614006: заявл. 21.03.2022: опубл. 31.03.2022 / А. В. Пронькин, А. И. Новиков.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

13. Пронькин А. В. Градиентные алгоритмы выделения контуров изображения / А. В. Пронькин // Новые информационные технологии в научных исследованиях : Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов: в 2 томах, Рязань, 12–14 декабря 2018 года. – Рязань, 2018. – С. 62-64.
14. Новиков А. И., Пронькин А. В. Алгоритмы фильтрации дискретного гауссовского шума в бортовых системах технического зрения // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание - 2018 : Сборник материалов XIV международной научно-технической конференции, Курск, 25–28 сентября 2018 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2018. – С. 189-191.
15. Пронькин А. В. Создание трехмерной модели местности по заданному облаку точек с помощью триангуляции / А. В. Пронькин, А. И. Новиков // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2018 : Сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 томах, Рязань, / Под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2018. – С. 73-79.
16. Пронькин, А. В. Математическая модель виртуальной телевизионной камеры // Методы и средства обработки и хранения информации: Межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 2019. – С. 62-67.
17. Пронькин А. В. Детекторы выделения границ на изображениях с автоматическим выбором порогов / А. В. Пронькин, А. И. Новиков // Материалы II Всероссийской конференции студентов и молодых ученых с международным участием "Естественнонаучные основы медико-биологических знаний", Рязань, 29–30 апреля 2019 года. – Рязань:

- Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, 2019. – С. 123-125.
- 18.Новиков, А. И., Пронькин, А. В. Метод и программа детектирования границ перепада яркости // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. В 4-х томах, Самара / Под редакцией В.В. Мясникова. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020. – С. 111-119.
 - 19.Пронькин А.В. Разработка и исследование математического обеспечения для совмещения разнородных изображений // Материалы VI научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020
 - 20.Пронькин А.В. Разработка и исследование методов подавления шума и детектирования границ на изображениях // Материалы VII научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021.
 - 21.Новиков, А. И., Пронькин А. В. Разностный метод оценивания дисперсии дискретного белого шума на цифровом изображении // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021): Сборник трудов по материалам VII Международной конференции и молодежной школы, Самара, 20–24 сентября 2021 года / Под редакцией В.В. Мясникова. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. – С. 22482.
 - 22.Пронькин А. В. Методы фильтрации дискретного белого шума и периодических помех на изображении / А. В. Пронькин // Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2021 : материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 15–17 декабря 2021 года. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (BookJet), 2021. – С. 301.
 - 23.Пронькин, А. В. Оценивание уровня шума в составе изображения с использованием вейвлетов Хаара / А. В. Пронькин // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". – 2022. – № 32. – С. 442-448. – DOI 10.20948/graphicon-2022-442-448
 - 24.Новиков, А. И., Пронькин А. В. Применение векторных масок в задачах цифровой обработки изображений // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2023) : сборник трудов по материалам IX Международной конференции и молодежной школы : в 6 т., Самара, 17–23 апреля 2023 года. Том 3. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 30143.

- 25.Пронькин, А. В. Фильтрация периодического шума с использованием детектора границ // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2024: Сборник трудов VII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 04–06 марта 2024 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2024. – С. 11-16.

ПРОНЬКИН АНТОН ВИКТОРОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ С НИЗКОЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТЬЮ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМА И
ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГРАНИЦ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 2.3.8. Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.10.2025. Формат 60x84 ¹/₁₆
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,2.
Тираж 100 экз.

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