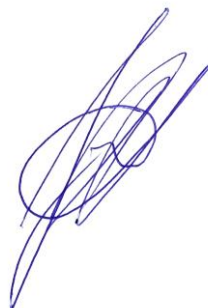


На правах рукописи



ОХОТНИКОВ Сергей Аркадьевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ
КОМПЛЕКСНОЗНАЧНЫХ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ
В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

Специальность 2.2.13 - Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Владимир – 2026

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Научный консультант **Хафизов Ринат Гафиятуллович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Чикрин Дмитрий Евгеньевич,**
доктор технических наук, директор института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань;

Приоров Андрей Леонидович,
доктор технических наук, профессор кафедры цифровых технологий и машинного обучения ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль;

Медведева Елена Викторовна,
доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных средств ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань.

Защита диссертации состоится «20» октября 2026 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.281.01 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ВлГУ и на сайте: <https://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан «15» июня 2026 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ученому секретарю диссертационного совета Д 24.2.281.01. Тел. (4922) 534238, E-mail: ags@vlsu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 24.2.281.01
кандидат технических наук, доцент



С.А. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Контурный анализ является одним из методов обработки изображений в системах технического зрения (СТЗ) в целом ряде прикладных задач. СТЗ и обработки изображений являются динамично развивающимся направлением современной науки, востребованным в различных областях, например, в дистанционном зондировании Земли, медицине, радиолокации, системах цифрового телевидения, охранных системах, системах распознавания номерных знаков автомобилей и т.п. Неотъемлемой частью СТЗ является распознавание образов, решающее задачу определения принадлежности входного изображения к одному из эталонных изображений объектов. При создании интеллектуальных систем часто требуется также отслеживать положение подвижных объектов в реальном времени на основе информации, полученной от оптических регистрационных устройств. Располагая рядом последовательных по времени цифровых изображений, можно выделить специальную информацию об объекте и затем использовать ее для обнаружения текущего положения объекта и отслеживания его перемещений.

СТЗ широко используются в микроэлектронике при производстве многослойных печатных плат. Они выполняют задачи ориентации и совмещения контролируемого и эталонного изображений. При этом позиционирование производится путем обнаружения и распознавания реперных знаков на изображении многослойной печатной платы. СТЗ дают возможность автоматизировать многие процессы сбора и обработки информации с минимальным участием человека. Также в условиях активного развития СТЗ для автономных устройств, робототехники и автоматизированного мониторинга сохраняет актуальность фундаментальная задача выбора оптимального метода распознавания объектов: современных, основанных на глубоком обучении, или классических, базирующихся на математических моделях. При применении свёрточных нейронных сетей стоит отметить их фундаментальное ограничение – это отсутствие врождённой инвариантности к аффинным преобразованиям.

Контурный анализ изображений обладает рядом преимуществ по сравнению с поточечной обработкой.

Во-первых, контуры содержат незначительное число элементов по сравнению с общим числом элементов изображения, что позволяет повысить быстродействие систем обработки.

Во-вторых, контуры изображений содержат в себе достаточную информацию о форме объекта, его масштабе и угловом положении в сцене. Особенностью методологии контурного анализа изображений является инвариантность алгоритмов обработки к масштабу и повороту изображения, что оказывается существенным преимуществом обработки по их контурам по сравнению с методами, основанными на поточечной обработке.

В-третьих, предлагаемый подход, в отличие от нейросетевых-моделей, не требует для обучения большого объема размеченных данных (которые, н-р, медицинские, не всегда доступны), а также больших вычислительных и временных ресурсов, что является критически важным для систем с ограниченными вычислительными ресурсами, но при этом необходимо выполнять задачи компьютерного зрения в реальном времени в условиях воздействия шумов.

Незначительное количество точек сцены, относящихся к контурам изображений объектов, по сравнению с общим количеством точек в сцене, а также инвариантность алгоритмов к повороту позволяют при использовании методов контурного анализа снизить требуемое количество операций при обработке сцены. Контурный анализ является основой обработки комплекснозначных сигналов и содержит традиционные для теории сигналов разделы. При этом не только сами контуры, но их спектры, корреляционные функции и характеристики контурных линейных фильтров представляются в виде контуров.

Развитие теории контурного анализа изображений в радиотехнических устройствах и СТЗ для их использования в промышленности, робототехнике, информационно-измерительной технике и пр. является крайне важным с точки зрения улучшения характеристик точности, быстродействия и помехоустойчивости, а также экономии времени.

Степень разработанности темы исследования. Цифровая обработка изображений в СТЗ является в настоящее время одним из наиболее актуальных направлений научных исследований. Этим проблемам посвящено большое число научных работ – как российских, так и в зарубежных. Существенный вклад в развитие методов цифровой обработки изображений в целом и обработки контуров изображений в частности внесли отечественные ученые Ю.И. Журавлев, В.А. Сойфер, Я.А. Фурман, И.Б. Гуревич, В.П. Дворкович, В.В. Сергеев, В.С. Киричук и другие, а также зарубежные исследователи Р. Гонзалес, У. Прэтт, Я. Харт, Д. Кенни и другие.

Разработано большое количество методов и подходов к выделению и обработке контуров изображений различной природы. При этом эффективность решения задач высокого уровня, включая задачи интеллектуальной обработки изображений, за-

частую оказывается неудовлетворительной. Основным фактором, ограничивающим качество результата, выступает сложность или принципиальная невозможность строгой формализации структурной организации изображения. Наряду с этим существует также проблема отсутствия универсальных алгоритмов, применимость которых обеспечивала бы высокую эффективность решения рассматриваемого класса задач интеллектуальной обработки контуров изображений в СТЗ.

В связи с этим возникает проблемная ситуация, связанная с противоречием между возможностями современной вычислительной техники и недостаточностью теоретической базы при ее использовании в СТЗ, основанных на применении контурного анализа изображений на основе применения комплекснозначного описания. Указанное противоречие определяет постановку цели и задач диссертационного исследования.

Объект исследования. Системы технического зрения (СТЗ), предназначенные для обнаружения и распознавания объектов по их изображениям, включая задачи обработки сигналов в радиотехнике, телевидении, медицинской диагностике, дефектоскопии и робототехнике.

Предмет исследования. Математические модели (непрерывные, случайные, с геометрическими искажениями) и методы обработки (спектральные, корреляционные, нелинейной фильтрации, оценки искажений) контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, обеспечивающие инвариантность к масштабу и повороту, а также повышение помехоустойчивости и быстродействия СТЗ.

Цель диссертационной работы – развитие теории контурного анализа изображений в части представления и обработки непрерывных и случайных контуров и контуров с геометрическими искажениями на основе применения комплекснозначного кодирования элементов для обработки изображений в системах технического зрения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **основные задачи**:

- 1) разработка математических моделей, непрерывных по способу представления и случайных по возможности предсказания контуров объектов, для описания изображений в системах технического зрения;
- 2) исследование спектральных и корреляционных методов оценки линейных преобразований контуров изображений объектов;
- 3) исследование методов обработки контуров изображений с учетом их представления в комплекснозначном коде;

4) разработка методов нелинейной фильтрации контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, для обработки зашумленных изображений;

5) разработка математической модели контуров изображений с геометрическими искажениями;

6) разработка метода оценки и структуры системы геометрических искажений контуров изображений.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы следующие методы: теории вероятности, теории статистических решений, теории контурного анализа изображений, моделирования процессов обработки изображений на ЭВМ.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной.

1. Развита теория контурного анализа изображений в части представления непрерывных и случайных контуров изображений, отличающаяся комплекснозначным кодированием и обеспечивающая инвариантность к линейным преобразованиям вращения и масштабирования изображений.

2. Разработаны спектральные и корреляционные методы оценки линейных преобразований непрерывных и случайных контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, позволяющие эффективно решать задачу распознавания изображений.

3. Разработаны методы обработки контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, отличающиеся возможностью применения традиционных для одномерных сигналов подходов.

4. Впервые разработаны методы нелинейной фильтрации контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, обеспечивающие обработку зашумленных изображений, и показано, что результат контурной нелинейной фильтрации определяется в основном процедурой упорядочивания элементов контура.

5. Впервые разработаны математические модели контуров изображений с геометрическими искажениями, позволяющие автоматизировать процедуру оценки параметров искажений в системах технического зрения.

6. Разработан метод оценки геометрических искажений контуров изображений и предложена структура систем оценки геометрических искажений, обеспечивающие вероятность правильной оценки не менее 0,95 при отношении сигнал – флуктуационный шум не менее 11 дБ.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в том, что разработаны математические модели и методы обработки контуров изображе-

ний, основанные на комплекснозначном кодировании контуров, позволяющие автоматизировать процедуру обработки изображений в системах технического зрения и обеспечивающие инвариантность к преобразованиям изображений. Применение предложенных в диссертации моделей и методов обработки контуров изображений позволит использовать интеллектуальные технологии при создании систем технического зрения.

Практическая значимость работы заключается в следующем. Использование алгоритма распознавания контуров изображений заданной формы на основе контурного анализа позволяет сократить объем вычислительных затрат в среднем на 2 порядка, по сравнению с корреляционно-экстремальным методом. Инвариантность алгоритмов обработки контуров изображений к масштабу и повороту позволяет решать проблему обучения нейронных сетей при ограниченности данных для обучения. Решение задачи распознавания (классификации) изображений при вероятности распознавания не ниже 0,98, использование контурного анализа обеспечивает выигрыш по скорости обработки в 1,97 раза по сравнению применением двухмерной сверточной нейронной сети при одновременной обработке 9000 незашумленных изображений разрешением 300х300 пикселей.

Внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной внедрены в АО «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца» в ходе выполнения СЧ НИЭР «Аэрозор» в части повышения эффективности формирования описания объектов интереса на основе признаков их наличия на радиолокационных изображениях и извлечения тематической информации об объектах интереса; СЧ НИР «Радиолокация-Х-РТИ» в части программно-методического обеспечения по верификации (валидации) продуктов, получаемых с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны авиационного и космического базирования; в рамках инвестиционного проекта «ЭЛИК» в части функционального программного обеспечения решения задач геопривязки и геопозиционирования радиолокационных изображений; ООО «Резонансные системы» при разработке устройств вторичной обработки магниторезонансных изображений при разработке изделий магниторезонансной томографии. Результаты работы внедрены и использованы при выполнении НИР: в рамках научно-исследовательских работ по гранту Российского научного фонда № 23-19-00568 «Методы и интеллектуальная система поддержки динамической устойчивости операторов эргатической системы» в период 2023–2025 гг., в рамках научно-исследовательской работы Министерства и образования и науки РФ, проект RFMEFI57717X0254 «Система интраоперационной навигации с поддержкой техно-

логии дополненной реальности на базе виртуальных 3D-моделей органов, полученных по результатам КТ диагностики, для малоинвазивных операций», 2017–2019 гг.; грант РФФИ, проект №08-01-12000 офи «Разработка методов и создание информационной технологии визуализации и сравнительного анализа сопряженных пространственных статических и динамических сцен», 2008–2009 гг.; НИР №8.1068.2011 «Разработка теоретических подходов к обработке непрерывных контуров изображений» в рамках государственного задания на 2012 г., внедрены в учебном процессе Поволжского государственного технологического университета при подготовке обучающихся по направлениям 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», 11.04.01 «Радиотехника», 12.03.04, 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии».

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели контуров изображений, в том числе непрерывных и случайных, отличающиеся комплекснозначным кодированием, обеспечивают инвариантность к линейным преобразованиям вращения и масштабирования изображений.

2. Методы обработки контуров изображений с учетом их представления в комплекснозначном коде, отличающиеся возможностью применения традиционных для одномерных сигналов подходов.

3. Методы нелинейной фильтрации контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, отличающиеся способом упорядочивания элементов, обеспечивают возможность обработки зашумленных изображений.

4. Математические модели контуров изображений с геометрическими искажениями, заданными в комплекснозначном коде, позволяют автоматизировать процедуру оценки параметров искажений в системах технического зрения.

5. Метод оценки геометрических искажений контуров изображений, основанный на применении метода максимума правдоподобия, и структура системы оценки геометрических искажений обеспечивают вероятность правильной оценки не менее 0,95 при отношении сигнал-флуктуационный шум не менее 11 дБ.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, непротиворечивость концепциям теории синтеза радиотехнических систем, а также аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Математические модели и методы обработки контуров изображений построены на теории вероятности, теории статистических решений и теории контурного анализа изображений и согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на международных и Всероссийских конференциях: тринадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», (Москва, 2007); 8th, 10th International Conference "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies" (Yoshkar-Ola, 2007, St. Petersburg, 2010); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе» (Йошкар-Ола, 2011); XXIII Всероссийской научно-технической конференции «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» (Рязань, 2010); Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения - XVII» (Казань, 2009); X, XI, XIII, XIV, XV и XVI международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Курск, 2012, 2013, 2017, 2018, 2019, 2021); XXIII международной научно-технической конференции «Медико-экологические информационные технологии» (Курс, 2020); XIII и XIV международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир, 2019, 2021); на ежегодных научных конференциях по итогам НИР ПГТУ и научных семинарах кафедры радиотехнических систем.

Соответствие паспорту специальности. Полученные в диссертационной работе результаты соответствуют пунктам Паспорта специальности: п.3 «Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия и помехоустойчивости», п.5 «Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки», п.11 «Разработка информационных технологий, в том числе цифровых, а также с использованием нейронных сетей для распознавания сигналов, изображений и речи в интеллектуальных радиотехнических, робототехнических системах технического зрения».

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 42 работы, из них 6 – индексируемые в Scopus, приравненные к журналам Перечня ВАК Минобрнауки РФ; 2 монографии в соавторстве; 12 – в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК; 19 – статьи в сборниках материалов конференций. Получены 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения, изложенных на 278 страницах машинописного текста, иллюстрирована 226 рисунками, 10 таблицами, содержит список литературы из 205 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, направление исследований, научная новизна и основные научные положения диссертационной работы.

В первой главе произведен обзор систем обработки изображений. Показано, что стремительное возрастание объема информации, скорости обработки и т.д. стимулирует появление новых и совершенствование известных методов обработки изображений в СТЗ. Исследовано состояние вопроса в области обработки изображений априори известных объектов (реперных знаков, шероховатости поверхности подложек микросхем и т.д.). Показано, что для обнаружения и распознавания изображений объектов применяют различные методы: интегральные, контурные и характерных точек. Исследованы их достоинства и недостатки.

Предложено для решения задачи обнаружения и распознавания изображений объектов интереса применить метод контурного анализа. При этом использовать комплекснозначное кодирование контуров изображений. Показано, что теория контурного анализа изображений объектов далека от завершения (на рис. 1 цветом выделены разделы, на данный момент не исследованные в полной мере). По вопросу математического представления моделей контуров необходимо расширить представление моделей непрерывных контуров изображений и классификацию случайных контуров. Для введенных математических моделей контуров следует расширить описание методов обработки, таких как спектральный и корреляционный анализ непрерывных контурных изображений. Также остались не рассмотрены специальные методы и алгоритмы обработки контуров изображений объектов, заданных на комплекснозначной плоскости. В рамках контурного анализа изображений не исследованы вопросы линейной фильтрации непрерывных комплекснозначных контуров, а также нелинейной фильтрации. Раздел оценки параметров преобразований контуров изображений следует дополнить вопросами линейных преобразований непрерывных контуров и нелинейных преобразований дискретных и непрерывных контуров изображений. Отдельно исследовать вопрос геометрических искажений контуров изображений и оценки их искажений. Рассмотрение данных вопросов позволило бы в полной мере привлечь в качестве базы теорию комплексного переменного. По ре-

результатам анализа состояния вопроса по теме исследования конкретизированы задачи диссертационной работы.

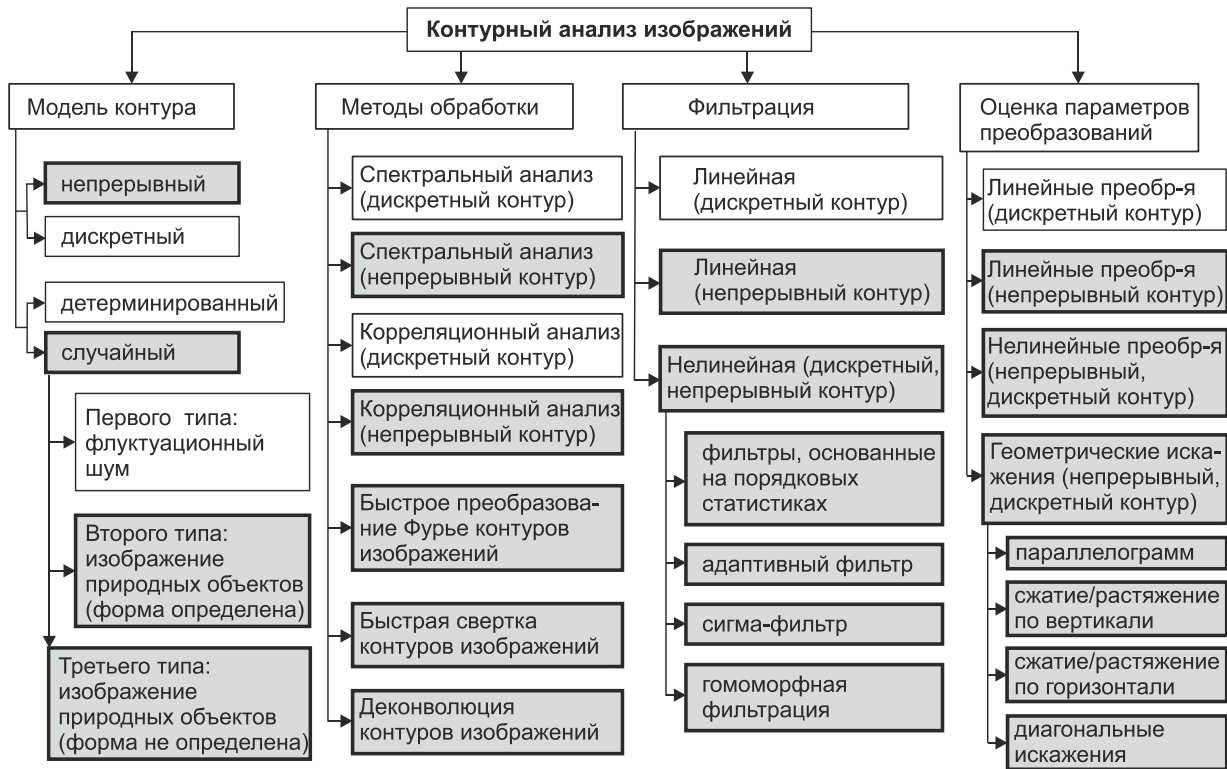


Рис. 1. Состояние вопроса в области обработки контурных изображений

Во второй главе расширена классификация контурных изображений. Введены понятия случайных контуров первого, второго и третьего типов. Случайный контур первого типа представляет собой аддитивную смесь детерминированного контура Γ и шумового контура Z . Контур $Z = \{\zeta(n)\}_{0,s-1} = \{\zeta_1(n) + i\zeta_2(n)\}_{0,s-1}$ является комплекснозначным аналогом широкополосного флуктуационного шума. Закон распределения величин $\zeta_1(n)$ и $\zeta_2(n)$ предполагается нормальным. Случайная величина $\zeta(n)$ является комплексной, и поэтому ее математическое ожидание и дисперсия будут равны: $m_\zeta = 0$ и $D[\zeta(n)] = 2\sigma^2$. Случайный контур второго типа описывает часть изображений природных объектов, форма которых определена. Примерами таких изображений могут быть изображения листьев растений, частей тела человека и т.п. Случайный контур третьего типа описывает изображения природных объектов, форма которых не определена. Примерами таких изображений являются изображения облаков, леса, луга, задымленности и т.п.

Предложена **математическая модель непрерывного контура изображения объекта, заданная на комплексной плоскости в виде замкнутой кривой**. Контур $X = \{\chi(l)\}_{0,L}$ как непрерывная замкнутая кривая на комплексной плоскости в виде

$\chi(l) = \chi_1(l) + i\chi_2(l) = |\chi(l)| \exp\{i\varphi(l)\}$, где $l \in (0, 2\pi)$; $\chi_1(l) = \operatorname{Re} \chi(l)$ и $\chi_2(l) = \operatorname{Im} \chi(l)$ – действительная и мнимая компоненты функции $\chi(l)$; $|\chi(l)| = \sqrt{\chi_1^2(l) + \chi_2^2(l)}$ и $\varphi(l) = \arg \chi(l)$ – амплитудное и фазовое представление функции $\chi(l)$. Контур изображения рассматриваются как векторы в линейном комплексном пространстве.

Предложена **математическая модель случайного контура для описания изображений объектов, форма которых определена**. Математическая модель случайного контура (СК) как комплекснозначной случайной функции, заданной совокупностью возможных реализаций, которая позволяет описать изображения объектов, форма которых определена. СК отличается от шумового тем, что СК описывает изображение объекта, форма которого определена. Это выражается в том числе и в том, что между элементами СК существует корреляционная связь. В то же время составляющие $\zeta_1(n)$ и $\zeta_2(n)$ шумового контура $\mathbf{Z}$ являются независимыми для любого n отсчеты шума.

Впервые введены понятия СК, математическое ожидание СК, дисперсия СК, представленного на комплекснозначной плоскости в комплекснозначном виде. Комплексная случайная функция $X(l)$ неслучайного аргумента l при каждом фиксированном значении аргумента является комплексной случайной величиной $X(l) = \operatorname{Re}(X(l)) + i\operatorname{Im}(X(l))$, заданная совокупностью ее возможных реализаций $\chi_1(l), \chi_2(l), \dots, \chi_n(l)$. Функция $X(l)$ задает непрерывный случайный контур. Если аргумент l СК изменяется дискретно, т.е. $l = 0, 1, 2, \dots, n$, то соответствующие ему значения случайной функции $X(l)$ являются случайными величинами и образуют дискретный СК.

Система случайных величин $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$ СК $X(l)$: $\chi_k = X(l_k)$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$, взятых в момент $l_1, l_2, \dots, l_n$, образует n -мерный случайный вектор $\mathbf{X} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)^T$, статистически может быть описан n -мерной плотностью вероятностей $W(\mathbf{X})$. Если число сечений n неограниченно и $\max_k |l_k - l_{k-1}| \rightarrow 0$, то предел плотности вероятности $W(\mathbf{X})$ будет характеризовать вероятность прохождения реализации $\chi(l)$ через бесконечно узкий коридор шириной $d\chi(l)$, образованный слившимися в две бесконечно близкие линии границами окон $[\chi_k, \chi_k + d\chi_k]$, $k = 0, 1, \dots, n$. Полагая любые реализации, оказавшиеся в этом коридоре, неразличимыми, можно считать, что предел $W(X(l)) = \lim_{n \rightarrow \infty} W(\mathbf{X})$, $\max_k |l_k - l_{k-1}| \rightarrow 0$, является вероятностной мерой отдельных реализаций случайного контура $X(l)$, т.е. осуществляет сортировку реализаций по вероятностям.

Математическое ожидание $m_X(l)$ СК $X(l)$ представляет собой неслучайную комплексную функцию, значение которой при каждом фиксированном значении аргумента l равно математическому ожиданию сечения, соответствующего фиксированному значению аргумента: $m_X(l) = M[X(l)]$. При этом $m_X(l) = m_{\text{Re}(X(l))}(l) + im_{\text{Im}(X(l))}(l)$.

На комплексной плоскости математическое ожидание СК можно представить как «усредненный контур», вокруг которого расположены другие контуры – реализации. При этом важным условием при вычислении математического ожидания СК является равенство между собой значений параметров линейных преобразований контуров его реализаций. Они должны иметь одинаковый масштаб $|\mu|$, нулевое значение угла $\Delta\varphi$ взаимного поворота и совпадающие положения начальных точек.

Корректировка параметров линейных преобразований контуров осуществляется следующим образом. Пусть получено M изображений реализаций одного и того же объекта со случайной формой. Причем положение объекта на изображении при формировании произвольно, т.е. возможны линейные преобразования с параметрами $\Delta\varphi$ поворота и $|\mu|$ масштабирования. Далее в результате применения к изображению оператора выделения контура сформирован ансамбль контуров $\chi_j(l)$, $j = 1, 2, \dots, M$. Необходимо осуществить нормировку этих контуров. Для этого элементы каждого контура поделим на величину своей нормы $\|\chi_j\|$. В результате получаем ансамбль нормированных контуров $\chi_{j,n}(l)$. Контуры, входящие в этот ансамбль, имеют одинаковую, равную единице норму. Затем сдвинем начальную точку одного из двух анализируемых контуров таким образом, чтобы нулевой отсчет ВКФ стал максимальным. Далее осуществляется коррекция угла взаимного поворота:

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{\text{Im}\eta_{jk}(0)}{\text{Re}\eta_{jk}(0)}, \text{ где } \eta_{jk}(0) - \text{нулевой отсчет ВКФ сравниваемых контуров } \chi_j(l)$$

и $\chi_k(l)$. В результате проведения перечисленных операций над контурами $\chi_j(l)$ и $\chi_k(l)$ они будут оптимально совмещены по критерию максимальной схожести.

Дисперсия $D_X(l)$ СК $X(l)$ представляет собой неслучайную неотрицательную функцию: $D_X(l) = D[X(l)] = M[\overset{\circ}{X}(l)^2]$, где $\overset{\circ}{X}(l) = X(l) - m_X(l)$ – центрированный СК.

В третьей главе исследуются **спектральные и корреляционные методы оценки линейных преобразований дискретных, непрерывных и случайных контуров изображений**. Задано линейное пространство вектор-контуров и получены ос-

новные аналитические соотношения. Рассмотрено влияние линейных преобразований непрерывного контура (НК) $\mathbf{X}$ и дискретного контура (ДК) $\mathbf{Г}$ на величину расстояния и скалярного произведения в комплексном пространстве. Показано, что изменение как масштаба, так и угловой ориентации не влияет на меру схожести двух НК и двух ДК.

Исследованы вопросы спектрального анализа НК. Определен ортогональный базис, по которому раскладывается произвольный НК, в виде семейства замкнутых непрерывных элементарных контуров (НЭК). НЭК, образующие ортонормированный базис, периодичны с периодом L и представляют собой окружности радиусом $1/\sqrt{L}$.

Выявлены особенности спектров, связанные с комплекснозначным характером и замкнутостью НК. Показано, что $\rho(m) = \rho^*(-m)$ и спектр вещественного сигнала характеризуется симметрично расположенными относительно отсчета $m = 0$ комплексно-сопряженными парами, и при оперировании с амплитудным спектром вещественного сигнала ограничиваются половиной отсчетов, взятых правее точки $m = 0$. Когда величина $\chi(l)$ становится комплексным числом, то для замены члена $\chi(l)\exp\left\{-i\frac{2\pi}{k}ml\right\}$ на комплексно-сопряженное, значение знака изменится не только в показателе экспоненты, но и в аргументе $\chi(l)$. Поэтому комплекснозначные сигналы не обладают свойством сопряженной симметрии и в их амплитудном спектре следует учитывать все отсчеты спектра (как в положительной, так и в отрицательной области).

Спектром стационарного СК $X(l)$ называется совокупность дисперсий всех составляющих её гармоник. При этом дисперсия одной n -ой гармоники с учетом того, что случайные величины U_n и V_n не коррелированы и дисперсии величин с одинаковыми индексами равны между собой, равна дисперсии величины U_n (или дисперсии случайной величины V_n). При этом $D[X(l)] = \sum_{n=1}^{\infty} D_n$, т.е. дисперсия стационарного СК может быть представлена в виде суммы гармоник и равна дисперсии составляющих её гармоник.

Исследованы вопросы корреляционного анализа НК. Показано что АКФ и ВКФ НК могут быть выведены на основе скалярного произведения $(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ в комплексном пространстве S векторов $\mathbf{X} = \{\chi(l)\}_{0,L}$ и $\mathbf{Y} = \{\psi(l)\}_{0,L}$. Для получения ВКФ $\tau(r)$ контуров $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$ учитываем, что эти контуры обладают свойством периодично-

сти. Совокупность значений этих скалярных произведений образуют ВКФ контуров X и Y . При $X = Y$ ВКФ переходит в АКФ.

Комплекснозначный характер сигнала по сравнению с вещественным сигналом определяет иной вид АКФ и ВКФ, так как один из сомножителей под знаком интегралом является комплексно-сопряженным. Комплексно-сопряженное произведение равно произведению комплексно-сопряженных сомножителей.

Также определены основные математические соотношения корреляционного анализа ДК. Так как ДК существует в дискретные моменты времени, то в выражении

интеграл заменяется на сумму: $\tau_{\text{ГН}}(m) = \sum_{n=0}^{s-1} \nu(n) \gamma^*(n+m)$, $m = 0, 1, \dots, s-1$.

ВКФ в пространстве C позволяет обнаружить высокую степень близости контуров X и Y , инвариантную к углу их взаимного поворота, сдвигу начальной точки и масштабу.

Корреляционная функция СК $X(l)$ представляет собой неслучайную функцию $K_X(l_1, l_2)$ двух независимых аргументов l_1 и l_2 , значение которой при каждой паре фиксированных значений аргументов равно корреляционному моменту сечений, соответствующих этим же фиксированным значениям аргументов:

$K_X(l_1, l_2) = M \left[\overset{\circ}{X}(l_1) \overline{\overset{\circ}{X}(l_2)} \right]$, где $\overline{\overset{\circ}{X}(l_2)}$ – центрированный СК, комплексно-

сопряженный к центрированному контуру $\overset{\circ}{X}(l_2)$. При равных между собой значениях аргументов $l_1 = l_2 = l$ корреляционная функция $K_X(l_1, l_2)$ СК $X(l)$ равна дисперсии $D_X(l)$ этого контура: $K_X(l, l) = D_X(l)$. Если вещественная $\text{Re}(X(l))$ и мнимая $\text{Im}(X(l))$ составляющие СК $X(l)$, представляющие собой действительные случайные функции аргумента l , коррелированы, то $K_X(l_1, l_2) = K_{\text{Re}(X)}(l_1, l_2) + K_{\text{Im}(X)}(l_1, l_2) + i[R_{\text{Re}(X)\text{Im}(X)}(l_2, l_1) - R_{\text{Re}(X)\text{Im}(X)}(l_1, l_2)]$, где $K_{\text{Re}(X)}(l_1, l_2)$ и $K_{\text{Im}(X)}(l_1, l_2)$ – корреляционные функции вещественной и мнимой составляющих СК $X(l)$ соответственно, $R_{\text{Re}(X)\text{Im}(X)}(l_2, l_1)$ и $R_{\text{Re}(X)\text{Im}(X)}(l_1, l_2)$ – взаимные корреляционные функции вещественной и мнимой составляющих комплексного СК $X(l)$ при разном порядке следования аргументов. ВКФ двух СК $X(l)$ и $Y(l)$ назовем неслучайную функцию

$R_{XY}(l_1, l_2) = M \left[\overset{\circ}{X}(l_1) \overline{\overset{\circ}{Y}(l_2)} \right]$. Взаимная корреляционная функция двух СК выражается

через взаимные корреляционные функции их действительных и мнимых частей следующим образом: $R_{XY}(l_1, l_2) = R_{\text{Re}(X)\text{Re}(Y)}(l_1, l_2) + R_{\text{Im}(X)\text{Im}(Y)}(l_1, l_2) + i[R_{\text{Im}(X)\text{Re}(Y)}(l_2, l_1) -$

$-R_{\text{Re}(X)\text{Im}(Y)}(l_1, l_2)]$. Если же $\text{Re}(X(l))$ и $\text{Im}(X(l))$ не коррелированы, то $K_X(l_1, l_2) = K_{\text{Re}(X)}(l_1, l_2) + K_{\text{Im}(X)}(l_1, l_2)$.

Нормированной корреляционной функцией $\rho_X(l_1, l_2)$ СК $X(l)$ назовем неслучайную функцию двух независимых переменных l_1 и l_2 , значение которой при каждой паре фиксированных значений аргументов равно коэффициенту корреляции сечений, соответствующих этим же фиксированным значениям аргументов:

$$\rho_X(l_1, l_2) = \frac{K_X(l_1, l_2)}{D_X(l_1)D_X(l_2)}.$$

Стационарную случайную функцию можно представить в виде гармонических колебаний со случайными амплитудами и случайными фазами:

$$X(l) = \sum_{n=1}^{\infty} [U_n \cos \omega_n l + V_n \sin \omega_n l] = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{U_n^2 + V_n^2} \sin(\omega_n l + \varphi_n), \text{ где } \varphi_n = \arctg(U_n/V_n);$$

U и V – некоррелированные случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и одинаковыми дисперсиями. Корреляционную функцию суммы можно

представить в виде $K_X(r) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(\omega_n r + \varphi_n)$. С учетом того, что СК $X(l)$ является

периодическим с периодом L : $\omega_n = 2\pi n/L$. Тогда $K_X(r) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(\frac{2\pi n}{L}r + \varphi_n)$.

Функция $K_X(r)$ является комплекснозначной функцией, а также будет периодической с периодом повторения L , можно рассматривать как разложение корреляционной

функции в ряд Фурье с коэффициентами: $D_n = \frac{1}{L} \int_0^L K_X(r) \sin(\frac{2\pi n}{L}r + \varphi_n) dr$.

В четвертой главе исследованы **методы обработки контуров изображений с учетом их представления в комплекснозначном коде**. Исследована возможность применения следующих методов: алгоритм передискретизации контуров, быстрого преобразования Фурье, быстрой свертки и деконволюции с учетом представления контуров в комплекснозначном виде. Применительно к контурам изображений передискретизация означает изменение их размерности. В силу особенностей обработки контуров изображений необходимость изменения их размерности возникает достаточно часто. Для решения данной задачи исследованы алгоритмы эквализации и передискретизации по схеме интерполяция/фильтрация/прореживание.

Произведено сравнение метода передискретизации контуров, представленных в комплекснозначном виде, с алгоритмом эквализации. Получено, что метод передискретизации, обеспечивающий сохранение информативности контурного изобра-

жения не менее чем на 9,5 % по сравнению с алгоритмом эквализации при изменении размерности контура в большую/меньшую сторону в 1,5 раза.

Исследована возможность применения алгоритмов БПФ для контуров, заданных в виде последовательности комплексных чисел. Алгоритм БПФ может быть применен для последовательностей $\text{Re } \gamma(n)$ и $\text{Im } \gamma(n)$ контура как по отдельности, так и в виде последовательности комплексных чисел. В первом случае находятся спектры $\rho_{\text{Re } \gamma(n)}(m)$ и $\rho_{\text{Im } \gamma(n)}(m)$ составляющих $\text{Re } \gamma(n)$, $\text{Im } \gamma(n)$ и производится их суммирование. Во втором случае осуществляется операция прореживания, когда исходный контур Γ разбивается на два контура длиной $s/2$: $\Gamma_q = \{\gamma_q(n)\}$, который включает отсчеты $\gamma(n)$ с четными индексами и $\Gamma_{nc} = \{\gamma_{nc}(n)\}$ – с нечетными индексами. Контур спектра $\mathbf{P}_q = \{\rho_q(m)\}_{0,(s/2)-1}$ и $\mathbf{P}_{nc} = \{\rho_{nc}(m)\}_{0,(s/2)-1}$ определяют первые $s/2$ отсчета ДПФ:

$$\rho(m) = \sum_{n=0}^{s/2-1} \gamma_q(n) e^{-i \frac{2\pi mn}{s/2}} + \sum_{n=0}^{s/2-1} \gamma_{nc}(n) e^{-i \frac{2\pi mn}{s/2}} e^{-i \frac{2\pi m}{s}}.$$

Для получения следующих $s/2$ отсчетов ДПФ выполняется операция объединения БПФ:

$$\rho(m + s/2) = \sum_{n=0}^{s/2-1} \gamma_q(n) e^{-i \frac{2\pi mn}{s/2}} - \sum_{n=0}^{s/2-1} \gamma_{nc}(n) e^{-i \frac{2\pi mn}{s/2}} e^{-i \frac{2\pi m}{s}}.$$

Операции прореживания и объединения БПФ продолжаются до получения $s/2$ двухточечных последовательностей.

Исследована возможность применения метода быстрой свертки применительно к контурным изображениям, заданным в комплекснозначном виде. Данный подход обусловлен существованием алгоритма БПФ, позволяющего быстро вычислять ДПФ. Для получения циклической свертки вычисляются спектры контуров $\Gamma = \{\gamma(n)\}$ и $\Lambda = \{\lambda(n)\}$, перемножаются и производится ОДПФ. Для получения ациклической свертки необходимо контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}$, $n=0,1,\dots,s-1$, и контур $\Lambda = \{\lambda(n)\}$, $n=0,1,\dots,g-1$, дополнить нулями до длины q из условия $q \geq s + g - 1$ (до степени двойки для применения алгоритма БПФ). Получаем модифицированные контуры Γ_m и Λ_m : Вычисляем ДПФ $\mathbf{P}_{\Gamma_m} = \{\rho_{\Gamma_m}(m)\}$, $\mathbf{\Omega}_m = \{\omega_m(m)\}$, $m=0,1,\dots,q-1$, контуров Γ_m и комплексно-сопряженного Λ_m , перемножаем спектры $\mathbf{P}_{\Gamma_m}$ и $\mathbf{\Omega}_m$. Из полученного спектра $\mathbf{P}_{\mathbf{H}_m}$ с помощью ОДПФ вычисляется контур $\mathbf{H}_m = \{\eta_m(m)\}$. Этот контур содержит результат свертки из $s + g - 1$ элементарных векторов (ЭВ), дополненный нулями до размерности q :

Исследованы вопросы нахождения деконволюции (обратной свертки) контурных изображений, основанной на процессе восстановления формы исходного контура.

ра по результату обработки его линейной системой. Обратная свертка для случая нахождения контура Γ на входе системы при известном отклике на выходе $\mathbf{H}$ и импульсной характеристики линейной системы Λ может быть представлена как $\mathbf{P}_\Gamma = \mathbf{P}_\mathbf{H} \mathbf{\Omega}^{-1}$, а для случая нахождения импульсной характеристики линейной системы Λ при известном контуре Γ на входе системы и отклике на выходе фильтра $\mathbf{H} : \mathbf{\Omega} = \mathbf{P}_\mathbf{H} \mathbf{P}_\Gamma^{-1}$, где $\mathbf{P}_\Gamma = \{\rho_\Gamma(m)\}_{0,s-1}$ – спектр входного контура Γ ; $\mathbf{P}_\mathbf{H} = \{\rho_\mathbf{H}(m)\}_{0,s-1}$ – спектр выходного контура $\mathbf{H}$; $\mathbf{\Omega} = \{\omega(m)\}_{0,s-1}$ – частотная характеристика линейной системы, символ « -1 » – оператор деконволюции.

В пятой главе разработаны методы нелинейной фильтрации контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, для обработки зашумленных изображений. Показано, что основной сложностью организации работы контурных фильтров, основанных на порядковых статистиках, является процедура упорядочивания ЭВ, заданных комплекснозначным кодом. В работе упорядочивание ЭВ контура $\Gamma = \{\gamma(n)\}$, $n = 0, \dots, s-1$, входящих в апертуру фильтра, производилось по одному из четырех параметров ЭВ: модулю $\alpha = |\gamma(n)|$, аргументу $\alpha = \arg \gamma(n)$, вещественной части $\alpha = \gamma_1(n)$, мнимой части $\alpha = \gamma_2(n)$, где α – принцип упорядочивания. Были исследованы медианный фильтр, фильтр усечения среднего, фильтр минимума, максимума, средней точки.

Контурный медианный фильтр при обработке контуров изображений заменяет центральный ЭВ медианой упорядоченной выборки, сформированной из всех ЭВ, входящих в апертуру $F_{w,m}$ фильтра с размером w и с центром в текущей точке m : $\nu(m) = \underset{\alpha}{med}\{\gamma(n) \mid n \in F_{w,m}\}$. Применение медианной фильтрации приводит к подавлению импульсной помехи. Медианную фильтрацию также применяют и для ослабления флуктуационного шума. Однако ее эффективность при этом ниже по сравнению с линейным сглаживающим фильтром.

Исследован вопрос о влиянии линейных преобразований масштабирования и поворота контура на результат фильтрации. Контурные фильтры, основанные на порядковых статистиках, являются нелинейными, и результат фильтрации определяется в первую очередь процедурой упорядочивания ЭВ контура. При масштабировании контура, т.е. когда $\nu(n) = |\mu|\gamma(n)$, упорядочивание по любому параметру α не изменяется, так как модули, вещественные и мнимые части ЭВ контура $\mathbf{N}$ изменяются пропорционально величине $|\mu|$, а аргументы ЭВ не изменяются. При повороте контура Γ на угол $\arg \mu$ модули ЭВ контура $\mathbf{N}$ также не изменяются, и, следовательно, не

изменяется упорядочивание по модулю, когда $\alpha = |\gamma(n)|$. Вещественные и мнимые части контура $\mathbf{N}$ изменяются в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \nu(n) &= \gamma(n)e^{i\arg\mu} = \gamma(n)(\cos(\arg\mu) + i\sin(\arg\mu)) = \\ &= \gamma_1(n)\cos(\arg\mu) + i\gamma_2(n)\cos(\arg\mu) + i\gamma_1(n)\sin(\arg\mu) - \gamma_2(n)\sin(\arg\mu) = \\ &= (\gamma_1(n)\cos(\arg\mu) - \gamma_2(n)\sin(\arg\mu)) + i(i\gamma_2(n)\cos(\arg\mu) + \gamma_1(n)\sin(\arg\mu)), \end{aligned}$$

что может приводить к изменению упорядочивания по вещественной $\alpha = \gamma_1(n)$ и (или) мнимой $\alpha = \gamma_2(n)$ частям. Аргументы ЭВ контура $\mathbf{N}$ при повороте контура $\mathbf{\Gamma}$ на угол $\arg\mu$ получают одинаковое приращение. Поэтому, если выполняется условие $\arg\nu(n) = \arg\gamma(n) + \arg\mu \leq 2\pi$, то упорядочивание по аргументу $\alpha = \arg\gamma(n)$ также не изменяется.

При одновременном воздействии преобразований масштабирования и поворота контура, т.е. когда $\nu(n) = \mu\gamma(n)$, где $\mu = \mu_1 + i\mu_2$, упорядочивание по модулю $\alpha = |\gamma(n)|$ не изменяется, а упорядочивание по вещественной части $\alpha = \gamma_1(n)$, мнимой части $\alpha = \gamma_2(n)$ и аргументу $\alpha = \arg\gamma(n)$ может как изменяться, так и не изменяться в зависимости от конкретных значений ЭВ контура $\mathbf{\Gamma}$ и величины μ .

Контурный фильтр, основанный на вычислении усеченного среднего, является модификацией контурного сглаживающего фильтра, но при этом из рассмотрения удаляются $d/2$ наименьших и $d/2$ наибольших ЭВ, упорядоченных по одному из четырех параметров α , в пределах маски $F_{w,m}$ фильтра размером w и с центром в текущей точке m . Отклик фильтра представляет собой результат усреднения оставшихся элементов:

$$\nu(m) = \frac{1}{w-d} \sum_{n \in F_{w,m}} \gamma'(n), \text{ где } \gamma'(n) - \text{оставшиеся элементы в пределах маски}$$

$F_{w,m}$ фильтра после удаления d ЭВ.

Величина d может изменяться от 0 до $w-1$. При $d = 0$ контурный фильтр усеченного среднего преобразуется в контурный сглаживающий фильтр (контурный фильтр скользящего среднего). При $d = w - 1$ получаем контурный медианный фильтр. Контурный фильтр усеченного среднего может быть использован, когда наблюдается одновременное воздействие на контур флуктуационного и импульсного шумов.

Контурные фильтры максимума и минимума предназначены для поиска максимальных и минимальных значений ЭВ в пределах маски $F_{w,m}$ фильтра размером w и с центром в текущей точке m с упорядочиванием по одному из четырех параметров α : $\nu(m) = \max_{\alpha} \{\gamma(n) \mid n \in F_{w,m}\}$, $\nu(m) = \min_{\alpha} \{\gamma(n) \mid n \in F_{w,m}\}$.

Контурный фильтр срединной точки объединяет в себе методы порядковых статистик и усреднения и заключается в вычислении среднего между максимальным и минимальным значениями в соответствующей окрестности:

$$\nu(m) = \frac{1}{2} [\max_{\alpha} \{\gamma(n) \mid n \in F_{w,m}\} - \min_{\alpha} \{\gamma(n) \mid n \in F_{w,m}\}].$$

Для организации работы адаптивного локального фильтра подавления шума должна быть заранее известна или оценена перед обработкой дисперсия флуктуационного шума в контуре. Принцип работы адаптивного локального фильтра подавления шума задается выражением $\nu(m) = \gamma(m) - \frac{\sigma^2}{\sigma_F^2} (\gamma(m) - m_F)$, где σ^2 – дисперсия флуктуационного шума в контуре; m_F и σ_F^2 – среднее значение ЭВ и дисперсия шума в пределах маски $F_{w,m}$ фильтра размером w и с центром в текущей точке m .

В том случае, когда контур не зашумлен и дисперсия σ^2 флуктуационного шума в контуре равна нулю, отклик фильтра $\mathbf{N} = \{\nu(m)\}$ равен обрабатываемому контуру $\mathbf{\Gamma} = \{\gamma(m)\}$. Если дисперсия шума σ_F^2 в пределах маски фильтра много больше дисперсии σ^2 флуктуационного шума в контуре, то отклик фильтра $\mathbf{N} = \{\nu(m)\}$ также приближенно равен обрабатываемому контуру $\mathbf{\Gamma} = \{\gamma(m)\}$. Обычно большое значение дисперсии шума σ_F^2 в пределах маски фильтра вызвано наличием существенных изменений аргументов следующих друг за другом ЭВ контура $\mathbf{\Gamma} = \{\gamma(m)\}$, например, из-за острых углов в форме контура изображения.

Для корректной работы адаптивного локального фильтра подавления шума должно выполняться следующее условие: дисперсия флуктуационного шума в контуре не превышает дисперсию шума в пределах маски фильтра. В противном случае отношение σ^2 / σ_F^2 приравнивается к единице.

Разработан контурный сигма-фильтр. Центральный ЭВ маски $F_{w,m}$ фильтра размером w и с центром в текущей точке m замещается средним значением, вычисленным только по тем ЭВ в пределах маски фильтра, значения которых попадают в $k\sigma$ -область относительно среднего ЭВ γ . Величина σ выбирается либо как среднеквадратическое отклонение (СКО) подавляемого шума, либо как СКО в маске, либо устанавливается равной СКО, полученному по всему контуру. Средний ЭВ γ в пределах маски фильтра определяется как $\gamma = \frac{1}{w} \sum_{k=0}^{w-1} \gamma(m - [w/2]k)$, где $[*]$ – целая часть

числа. Величина $k\sigma$ задает радиус окружности на комплексной плоскости, ограничивающей область с центром в конце вектора γ , попадание в которую ЭВ в пределах

маски фильтра определяет, будет ли учитываться данный ЭВ для формирования выходного отклика фильтра. При этом выбор параметра k в значительной степени определяет результат сигма-фильтрации контуров изображений.

Таким образом, разработанные методы нелинейной фильтрации контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, обеспечивают возможность обработки зашумленных изображений.

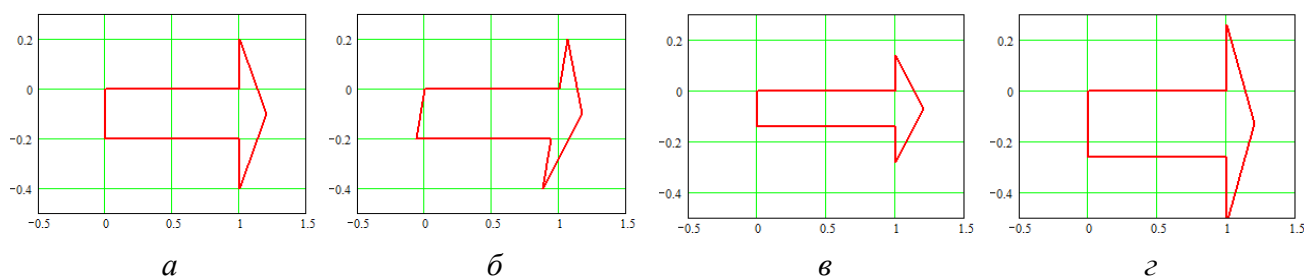
В шестой главе представлены **разработанные математические модели контуров изображений с геометрическими искажениями и метод оценки геометрических искажений контуров изображений объектов**. Геометрические искажения (ГИ) изображений возникают из-за изменения координат передаваемых элементов и проявляются в виде нарушения геометрического подобия воспроизводимого изображения его оригиналу и оказывают значительное влияние на качество обработки изображений объектов. Знание характера искажений, вносимых аппаратурой и (или) оптической системой устройства формирования изображения, а также условиями их формирования, позволяет компенсировать их при обработке.

В общем случае модель процесса искажения контура изображения предложено описывать действием некоторого искажающего оператора T на исходный контур Γ : $N = T[\Gamma] + Z$.

Модель дискретного контура $N = \{v(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, s-1$, полученного как результат искажения исходного контура $\Gamma = \{\gamma(n)\}$:

- параллелограмм $v(n) = \gamma(n) + \lambda\gamma_2(n)$,
- растяжение-сжатие по вертикали $v(n) = \gamma(n) \pm i\lambda\gamma_2(n)$,
- растяжение-сжатие по горизонтали $v(n) = \gamma(n) \pm \lambda\gamma_1(n)$,
- диагональное искажение $v(n) = \gamma(n) \pm i\lambda\gamma_1(n)$,

где λ – параметр искажения. Аналогичные модели искажений непрерывного контура $Y = \{v(l)\}$ получены как результат искажения исходного непрерывного контура $X = \{\chi(l)\}$, l любое от 0 до L . На рис. 2 представлены примеры искажений контура при $\lambda = 0,3$.



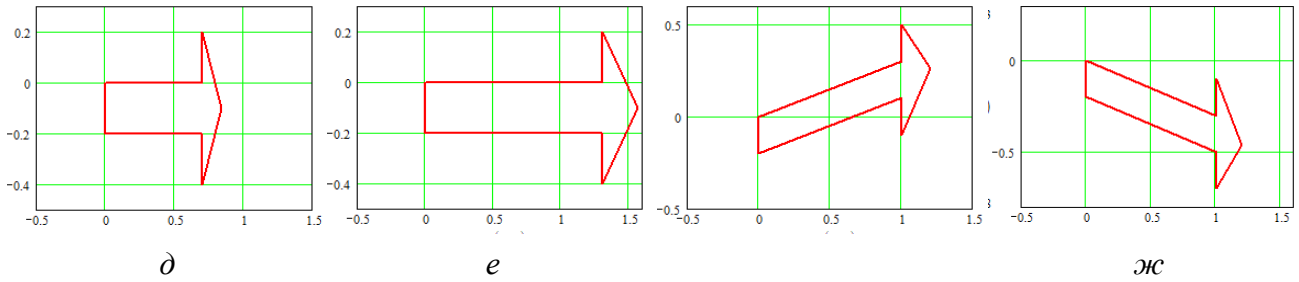
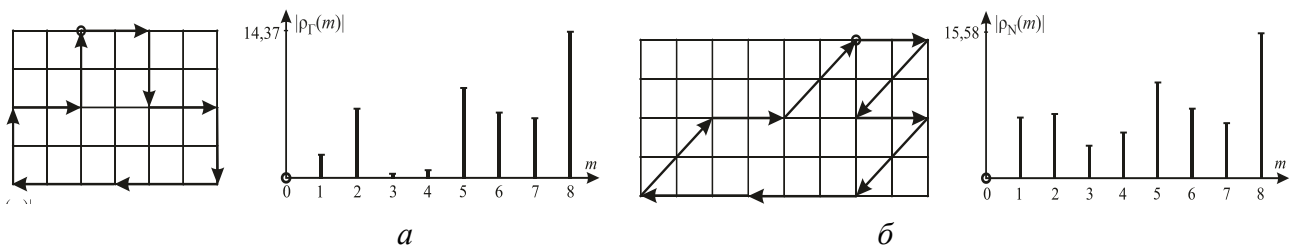


Рис. 2. Геометрические искажения контура при $\lambda = 0,3$: *a* – исходный контур; *б* – искажение типа «параллелограмм»; *в* – сжатие по вертикали; *г* – растяжение по вертикали;

д – сжатие по горизонтали; *е* – растяжение по горизонтали; *ж* – диагональные искажения

Исследовано влияние рассмотренных искажений на спектры контуров Амплитудные спектры контуров, полученных в результате геометрических преобразований в виде изменения размеров изображения, по форме одинаковые. Однако структура спектров у этих контуров разная. Так, ДПФ контуров $\nu_{CB}(n)$, $\nu_{PB}(n)$, $\nu_{CF}(n)$ и $\nu_{PF}(n)$ равно соответственно $\rho_{CB}(m) = \rho_{\Gamma}(m) - \lambda \rho_{\text{Im}\Gamma}(m)$, $\rho_{PB}(m) = \rho_{\Gamma}(m) + \lambda \rho_{\text{Im}\Gamma}(m)$, $\rho_{CF}(m) = \rho_{\Gamma}(m) - \lambda \rho_{\text{Re}\Gamma}(m)$, $\rho_{PF}(m) = \rho_{\Gamma}(m) + \lambda \rho_{\text{Re}\Gamma}(m)$, $m = 0, 1, \dots, s-1$.

Одновременно воздействие различных искажений может быть представлено в виде суммы моделей отдельных искажений. Так, если параметр искажения λ задать в виде комплексного числа, т.е. $\lambda = \lambda_1 \pm i\lambda_2$, то преобразование типа «параллелограмм» становится составным и может быть представлено в виде суммы искажений типа «параллелограмм» и «растяжение/сжатие по вертикали»: $\nu(n) = \gamma(n) + \lambda_1 \gamma_2(n) \pm i\lambda_2 \gamma_2(n)$. На рис. 3 приведено пояснение процесса внесения искажения через спектральные составляющие элементарных контуров подвергнутых геометрическим искажениям типа «параллелограмм».



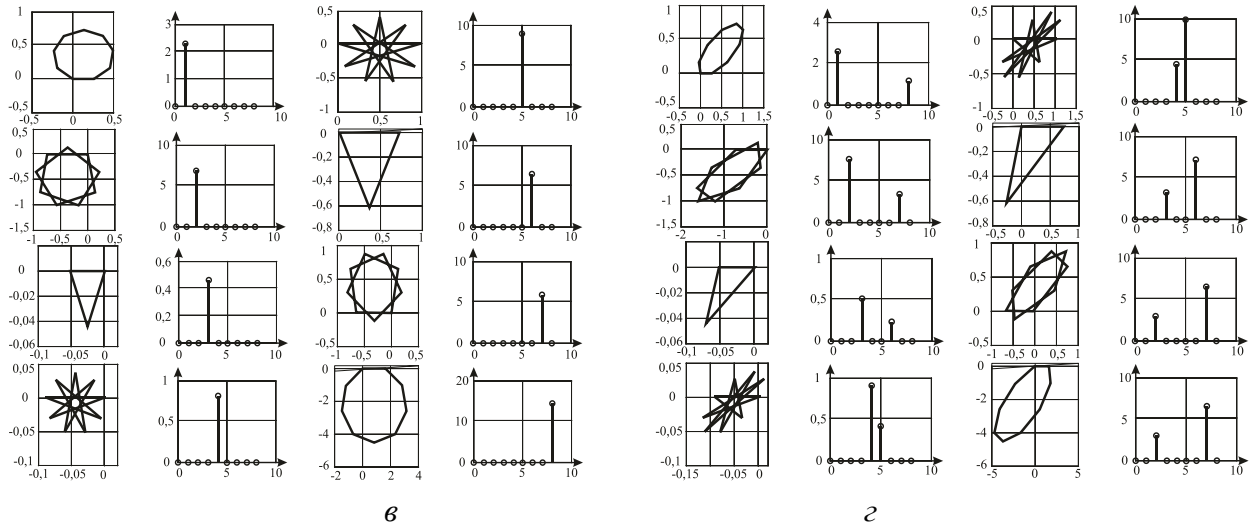


Рис. 3. К пояснению процесса внесения искажения через спектральные составляющие элементарных контуров (ЭК): *a* – анализируемый контур и его спектр; *б* – контур (*a*) представленный в виде семейства ЭК и их спектров; *z* – результат преобразования спектров ЭК при внесении искажения; *б* – контур и его спектр, полученный в результате суммирования спектров ЭК (*z*) подвергнутых геометрическим искажениям типа «параллелограмм» (*б*)

Разработан метод оценки геометрических искажений контуров изображений объектов. Формализованную модель оценки параметров ГИ контуров изображений объектов определим следующим образом. Пусть на входе наблюдается контур $Y = \{v(l)\}$, $l \in 0, L$. Контур Y образован как сумма контура $X(\lambda) = \{\chi(l, \lambda)\}$, $l \in 0, L$, и помехи $Z = \{\xi(l)\}$, $l \in 0, L$. При этом полезный сигнал содержит параметр λ – параметр ГИ. По результатам анализа контура Y необходимо вынести решение о том, какое значение имеет параметр λ контура X .

Вероятностный характер условий наблюдения контура Y приводит к отклонению измеренного значения параметра $\hat{\lambda}$ от исходных λ . Обозначим $\delta = \lambda - \hat{\lambda}$ – точность оценки ГИ. Оптимизация процедуры оценки ГИ контуров изображений предусматривает минимизацию случайной составляющей δ результата оценки.

Оценку ГИ контуров производим по правилу максимума правдоподобия. Считаем шум Z стационарным и белым для функционала ПВ процесса Y при условии наличия в нем контура $\Gamma(\lambda)$. Выражение для функции правдоподобия позволяет установить правило оценки максимального правдоподобия параметров ГИ контура на фоне гауссовского шума. Оценка максимального правдоподобия параметра искажения λ есть значение $\hat{\lambda}$, максимизирующее показатель правой части:

$$z(\hat{\lambda}) - E(\hat{\lambda})/2 = \max_{\lambda} [z(\lambda) - E(\lambda)/2].$$

Если рассматривать нормированный контур Y , при котором ГИ не приводят к изменению энергии сигнала, $E(\lambda) = E = \text{const}$, то $z(\hat{\lambda}) = \max_{\lambda} z(\lambda)$.

Таким образом, оценка максимального правдоподобия $\hat{\lambda}$ есть такое его значение, при котором принятая реализация $\mathbf{Y}$ обладает наибольшим значением корреляции с $\mathbf{X}(\lambda)$. Поэтому оценку параметра λ контура можно сформировать, располагая набором M формирователей скалярного произведения, на которые параллельно подается входная реализация $\mathbf{Y}$. В качестве опорных во всех формирователях используются копии контура $\mathbf{X}(\lambda)$ с различными значениями параметра λ . Решающий блок вырабатывает в качестве оценки значения λ в канале с максимальным выходным эффектом. При этом число каналов M может быть равно числу различных дискретных значений λ .

Указанный подход является оптимальным (функционирующим на основе правила максимума правдоподобия) дискриминатором M контуров равной энергией. Разработана структура системы оценки геометрических искажений контуров изображений (рис. 4).

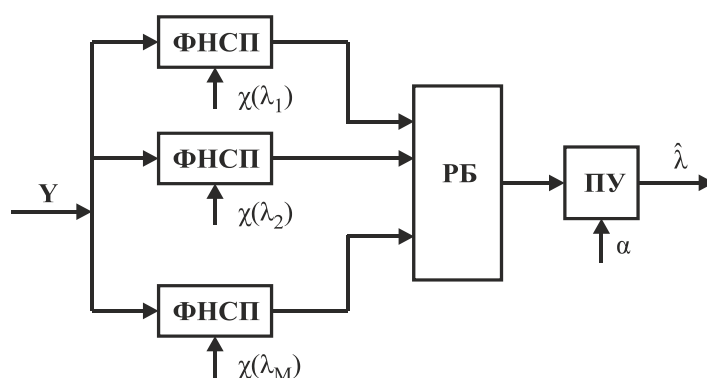


Рис. 4. Структурная схема системы оценки геометрических искажений контуров изображений

Процедуру оценки параметра λ можно рассматривать как многоэтапную. При этом оценка $\hat{\lambda}$, полученная на каждом этапе, служит в качестве начального значения при формировании контура $\mathbf{X}(\lambda)$. На рис. 5 представлена структурная схема базового блока оценки (ББО) ГИ контура.

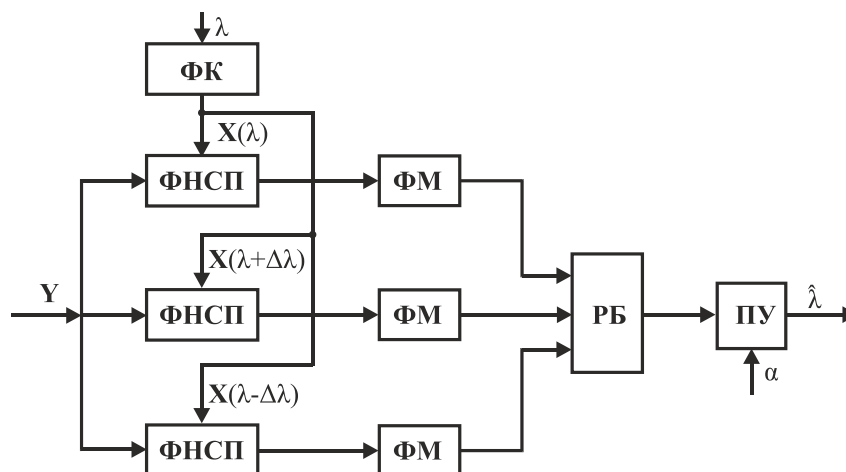


Рис. 5. Структура базового блока оценки геометрических искажений контура

Точность оценки δ ГИ контура на каждом этапе определяется как $\delta = \Delta\lambda / 2$. В соответствии с требованиями, точность оценки δ ГИ контура структура системы оценки может содержать N блоков (рис. 6).

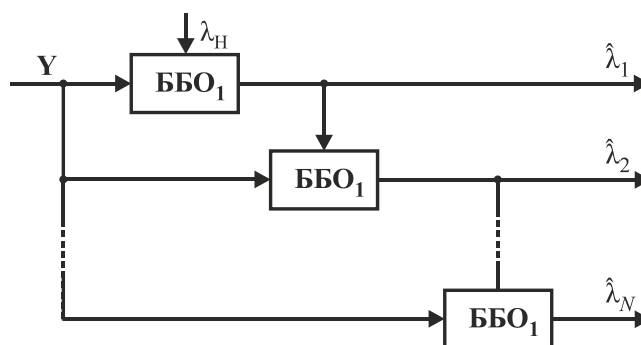


Рис. 6. Структура системы оценки геометрических искажений контура

Разработано устройство аналоговой обработки, которое выполняет операцию скалярного произведения принятого и эталонного сигналов (рис. 7). Эталонный сигнал принадлежит одному из N классов сигналов, которые хранятся в базе данных. При вычислении скалярного произведения принятый и эталонный сигналы поступают на аналоговый коммутатор напряжения (АК), который управляется микроконтроллером. С выхода АК ($Q_1 - \text{Re } X$, $Q_2 - \text{Im } X$, $Q_3 - \text{Re } Y$, $Q_4 - \text{Im } Y$) реальные и мнимые части обоих сигналов поступают на блоки аналоговой обработки – вычисления скалярного произведения (блок А и блок Б).

Эти блоки состоят из перемножителей, сумматоров и интеграторов. Выходной сигнал блока А представляет реальную часть скалярного произведения, а блока Б – его мнимую часть. Для дальнейшей цифровой обработки имеется аналого-цифровой преобразователь (АЦП). С его выхода оцифрованный сигнал поступает на микроконтроллер. С блоков А, Б сигнал поступает через видеоусилитель на индикаторное

устройство, через которое в режиме реального времени можно наблюдать процессы на выходе блока обработки.

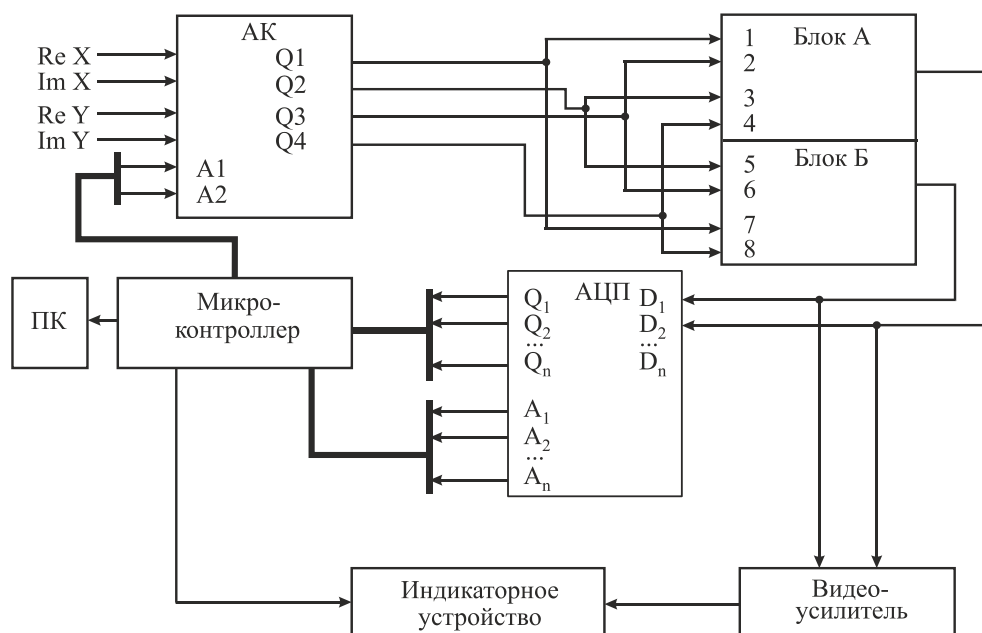


Рис. 7. Устройство обработки непрерывных контуров

В седьмой главе получены результаты эффективности системы оценки геометрических искажений контуров изображений и *разработана обобщенная структурная схема системы обработки контуров изображений*. Пусть ДК, $\mathbf{K} = \{\kappa(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, s-1$, эталонный контур исходного изображения, заданный на комплексной плоскости полученный из НК. Набор искаженных контуров $\mathbf{E}_H$, $\mathbf{E}_{CB}$, $\mathbf{E}_{PB}$, $\mathbf{E}_{CT}$, $\mathbf{E}_{PG}$, $\mathbf{E}_{TT}$ и $\mathbf{E}_{TB}$, полученных на основе эталонного контура $\mathbf{K} = \{\kappa(n)\}$ путем добавления соответствующего ГИ, образуют базу эталонных контуров с различными ГИ. Параметры контуров, угол поворота φ и сдвиг начальной точки d полагаются определенными и равными нулю. На вход устройства классификации типа ГИ подается входной контур $\mathbf{K}_1 = \{\kappa(n) + \nu(n)\}$ с внесенным ГИ. Для оценки работоспособности во входной контур вносится искажение одного типа. Задача идентификации типа ГИ состоит в обоснованном вынесении решения о принадлежности входного контура к одному из эталонных классов контуров. Решение принимается на основе критерия максимума нормированного скалярного произведения входного контура со всеми контурами из базы эталонов, что позволяет одновременно определить тип и параметр искажения.

Проведена оценка параметра искажения λ_H при сравнении входного контура со всей базой эталонных контуров. Сформирована база эталонных контуров: по каж-

дому типу искажения – 71 эталонный контур. Искажения E_{CB} , E_{PB} , и E_{CG} , E_{PG} объединены в одну группу искажений. Объем базы эталонных контуров составил 355 контуров. На рис. 8 представлен пример оценки вероятности правильного распознавания ГИ параллелограмм для пяти классов эталонов с разными параметрами ГИ.

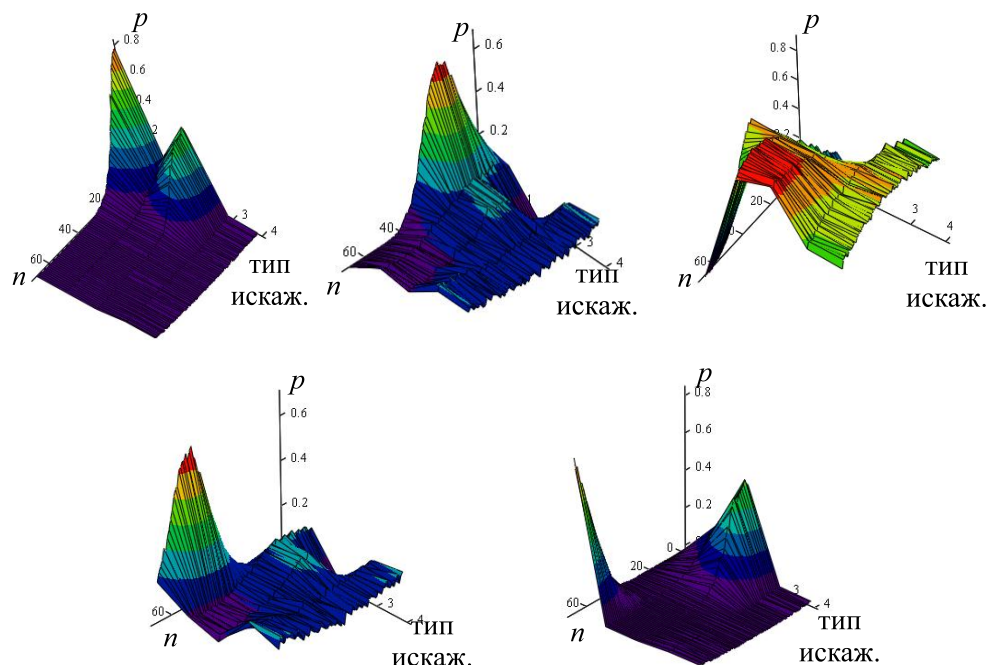


Рис. 8. Оценка вероятности правильного распознавания для пяти эталонных контуров ГИ параллелограмм при λ_H равным -7; -3,5; 0; 3,5; 7

По оси абсцисс отложен номер эталонного контура в классе: при $n = 0$, $\lambda_H = -7$, а при $n = 70$, $\lambda_H = 7$. По оси ординат отложен номер класса типа искажения: где 0 – геометрическое искажение типа «параллелограмм»; 1 – искажение «сжатие/растяжение по вертикали»; 2 – искажение «сжатие/растяжение по горизонтали»; 3 – искажение «трапецеидальное искажение в вертикальной плоскости»; 4 – искажение «трапецеидальное искажение в горизонтальной плоскости». По оси аппликат отложена вероятность правильного распознавания контура p .

Выполнено исследование зависимости вероятности корректного определения параметра ГИ от СКО флуктуационного шума при различном количестве базовых эталонных контуров. Разработан алгоритм оценивания «простых» ГИ.

Построены зависимости вероятности правильной идентификации класса эталона от отношения СКО флуктуационного шума на входе системы оценки ГИ. На рис. 9–10 приведены указанные зависимости для случаев использования 3 и 7 эталонных контуров соответственно.

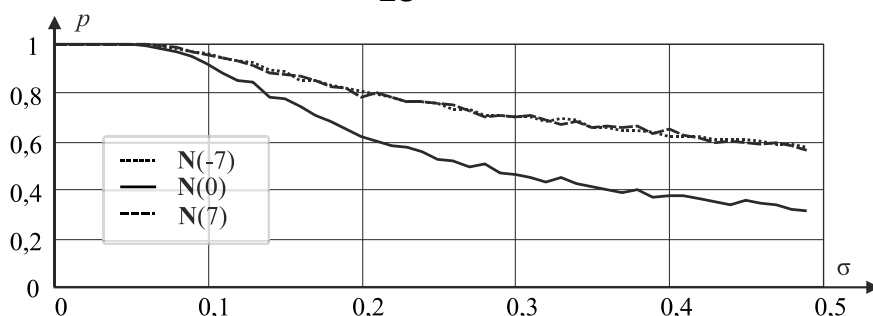


Рис. 9. Зависимость вероятности правильного определения параметра ГИ «искажение типа параллелограмм» от СКО флуктуационного шума: система из трех базовых эталонных контуров при наличии на входе одного из трех наблюдаемых контуров $N(-7)$, $N(0)$, $N(7)$

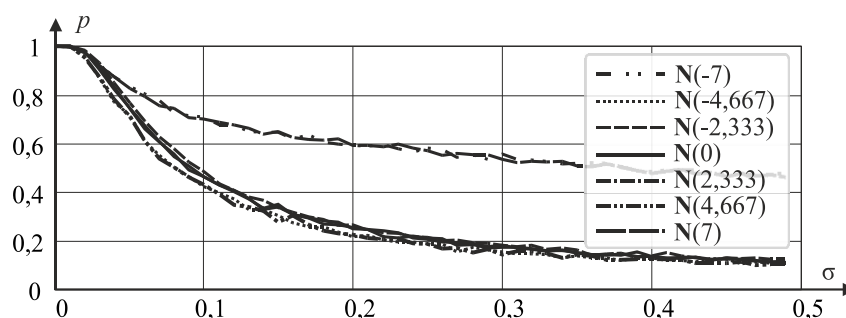


Рис. 10. Зависимость вероятности правильного определения параметра ГИ «искажение типа параллелограмм» от СКО флуктуационного шума: система из семи базовых эталонных контуров при наличии на входе одного из семи наблюдаемых контуров $N(-7)$, $N(-4,667)$, $N(-2,333)$, $N(0)$, $N(2,333)$, $N(4,667)$, $N(7)$

Получено, что с увеличением количества эталонных контуров в системе оценки типа ГИ общая вероятность правильного принятия решения о типе ГИ снижается. Например, при отношении «сигнал/шум» $q = 2$ для наблюдаемого контура $N(-7)$ с геометрическим искажением $\lambda = -7$ получим

система из 3 эталонных контуров – $p = 0,8$ (рис. 9);

система из 7 эталонных контуров – $p = 0,6$ (рис. 10).

Разработана обобщенная структурная схема системы обработки контуров изображений (рис. 11). На вход системы подается НК или ДК. Основной блок обработки состоит из двух частей: аналоговой и цифровой. В зависимости от поступившего контура производится предварительная обработка контурных изображений. Отфильтрованное контурное изображение поступает в блок оценки геометрических искажений. Далее производится распознавание контурных изображений на основе уже имеющегося банка эталонных контуров. Результаты распознавания отображаются на индикаторе.

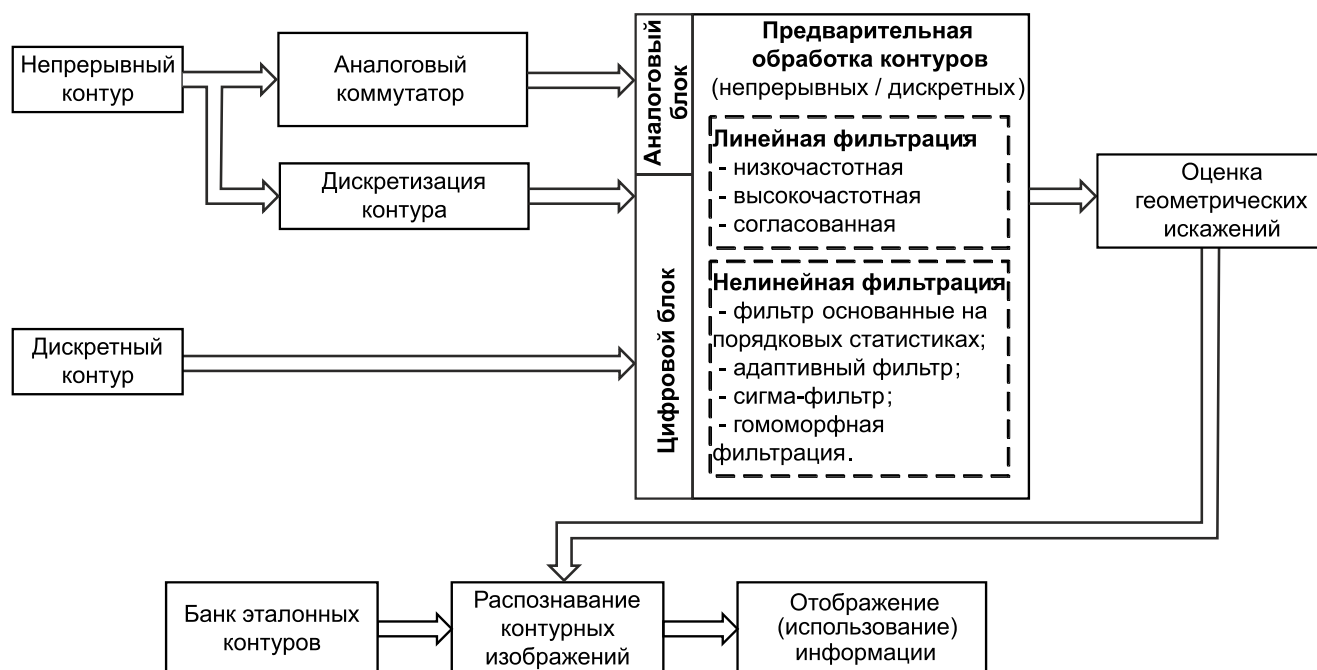


Рис. 11. Обобщенная структурная схема системы обработки контурных изображений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ современного состояния проблемы обработки контуров изображений. В силу специфики представления контуров возникает необходимость в решении комплекса задач, направленных на дальнейшее развитие теории контурного анализа. Показано, что в существующей теории остаются непроработанными следующие аспекты: анализ непрерывных комплекснозначных контуров, геометрические искажения контуров, нелинейные искажения контуров изображений, а также задачи нелинейной фильтрации изображений. В ходе решения указанной научно-технической проблемы – развития теории контурного анализа – в диссертационной работе предложены и внедрены новые модели, методы и алгоритмы. Полученные основные результаты позволяют системно устранить выявленные пробелы и повысить эффективность обработки контуров изображений.

Получены следующие результаты:

1. Разработаны теоретические основы обработки и распознавания непрерывных и случайных контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, в частности:

– впервые предложена математическая модель непрерывных контуров изображений в виде непрерывной замкнутой кривой, заданной на комплексной плоскости непрерывного переменного, мера схожести которого описывается в виде нормированного скалярного произведения, инвариантного к линейным преобразованиям из-

менениям масштаба и угловой ориентации, позволяющая получить потенциальные характеристики распознавания контуров изображений;

- впервые предложена математическая модель случайного контура, определяемая как комплекснозначная случайная функция, заданная ансамблем возможных реализаций, дающая возможность описания изображений объектов.

2. Разработаны спектральные и корреляционные методы оценки линейных преобразований непрерывных и случайных контуров изображений, заданных в комплекснозначном коде, позволяющие эффективно решать задачу распознавания изображений.

3. Разработаны методы обработки изображений с учетом их представления в комплекснозначном коде, обеспечивающие возможность применения традиционных для теории одномерных сигналов подходов, в частности:

- метод передискретизации комплекснозначных контуров изображений, отличающийся возможностью сохранения информации о форме контурного изображения в частотной области; обеспечивающий сохранение информативности контурного изображения не менее чем на 9,5 % по сравнению с алгоритмом эквализации при изменении размерности контура в большую/меньшую сторону в 1,5 раза;

- алгоритм быстрого преобразования Фурье, алгоритмы свертки и обратной свертки (деконволюции) для контуров изображений объектов, заданных в комплекснозначном коде.

4. Разработаны методы нелинейной фильтрации контуров изображений, позволяющих повысить помехоустойчивость СТЗ в условиях воздействия шума, в частности:

- разработано четыре разновидности контурных фильтров, основанных на порядковых статистиках, с упорядочиванием по модулю, аргументу, вещественной и мнимой частям комплекснозначных контуров изображений объектов: исследованы медианный фильтр, фильтр усеченного среднего, фильтр максимума, минимума, средней точки для контуров изображений, представленных на комплексной плоскости в случаях воздействия шума;

- модифицированный контурный сигма-фильтр для контуров изображений, представленных на комплексной плоскости, основанный на выборе среднеквадратического значения в окне фильтра для комплекснозначных значений контура.

5. Разработан метод оценки параметров геометрических искажений контуров изображений в условиях неопределенности априорных данных о параметрах и воздействия шумов, позволяющие решать задачу распознавания получаемых изображений в СТЗ с различными геометрическими искажениями, включающие:

- математические модели контуров изображений с геометрическими искажениями, обладающие инвариантностью к преобразованию сдвига, масштабирования контура и обеспечивающие визуальное представление о форме объектов, а также позволяющие автоматизировать процедуру оценки параметров искажений в системах технического зрения;

- итерационный метод углового согласования контуров изображений объектов в системах оценки геометрических искажений контуров изображений в условиях отсутствия предварительной информации об угловых параметрах и масштаба изображений, основанный на свойствах комплекснозначных контуров задавать одновременно меру схожести сигнала и величину угла между ними и обеспечивающий возможность выполнения операций как корректного, так и некорректного углового совмещения контуров изображений;

- получены новые результаты зависимости влияния геометрических искажений на спектры контуров изображений, дающих возможность оценки зависимостей вида геометрического искажения контура изображения объекта на его спектр, что позволит решить задачу распознавания контуров изображений в СТЗ по их частотному представлению. Синтезированы оптимальные по критерию максимума правдоподобия алгоритмы распознавания комплекснозначных контуров изображений объектов. Выполнено моделирование работы системы распознавания и построены характеристики правильного распознавания.

6. Предложена новая структура организации системы обработки контуров изображений, специфика которой определяется введением следующих функциональных блоков: блока обработки непрерывных и случайных комплекснозначных контуров; блока предварительной обработки, осуществляющий нелинейную фильтрацию контуров изображений; блока оценки геометрических искажений контуров заданных в комплекснозначном виде, обеспечивающий правильность распознавания.

Разработана методика и выполнены экспериментальные исследования автоматизированной системы оценки распознавания геометрических искажений контуров комплекснозначных изображений объектов с априорно неизвестными параметрами, основанные на применении метода максимума правдоподобия, что верифицировало теоретические результаты и выводы работы и продемонстрировало эффективность углового согласования и оценки параметров контуров с геометрическими искажениями.

Получены зависимости правильного распознавания изображений от отношения сигнал/шум для аддитивной модели шума, распределенного по нормальному закону, полученные с использованием нейронных сетей CNN и методов контурного

анализа. Экспериментально установлено, что изменение линейных преобразование контуров, заданных на комплексной плоскости не влияет на графики зависимостей вероятности правильного распознавания, что связано с инвариантностью преобразований комплекснозначных контуров изображений.

При формировании базы данных контуров изображений достаточно внести одно описание для каждой формы контура. Метод контурного анализа позволяет решить проблему обучения нейронных сетей в задачах с ограниченным доступом к данным или их отсутствием.

Получено, при потоковой обработке 9000 незашумленных изображений размером 300x300 пикселей метод контурного анализа обеспечивает выигрыш по скорости обработки в 1,97 раза по сравнению с применением двухмерной сверточной нейронной сети.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в издании, индексируемом в Scopus, приравненные к журналам Перечня ВАК

1. **Okhotnikov, S.A.**, Kim, E.V., Khafizov, D.G. *et al.* A Method for Detecting Outlines and Assessing Cross-Sectional Areas of the Neck Vessels in Ultrasound Investigations. *Biomed Eng* 56, 264–267 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10527-022-10216-0>.
2. Khafizov RG, **Okhotnikov SA**. Nonlinear filtering of image contours defined in complex code. *Computer Optics* 2020; 44(5): 757-762. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-745.
3. Khafizov, R.G., **Okhotnikov, S.A.**, Khafizov, D.G. *et al.* Analyzing the Risk of Injury for Pathways of Instrument Insertion into a Surgical Target Area While Preparing for Laparoscopic Surgery. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 82, 1537–1541 (2018). <https://doi.org/10.3103/S1062873818120109>.
4. Хафизов, Р.Г. Модели контуров изображений объектов при наличии геометрических искажений / Р.Г. Хафизов, **С.А. Охотников**, Т.В. Яранцева // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 404-409. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-404-409.
5. **Okhotnikov S.A.** Discretization of continuous contours of images, defined in a complex-valued form / S.A. Okhotnikov, R.G. Khafizov // *Computer Optics*, 2012, 36(2). – P. 274–278.
6. Khafizov R.G. Linear filtering of continuous contours of images, defined in a complex form / R.G. Khafizov, **S.A. Okhotnikov** // – *Computer Optics*, 2010, 34(3). – P. 408–416.

Монографии

7. Основы теории обработки непрерывных контуров изображений: монография / Р. Г. Хафизов, А. А. Роженцов, Д. Г. Хафизов, **С. А. Охотников**; под общ. ред. проф. Р. Г. Хафизова. – Йошкар-Ола, 2015. – 172 с.

8. **Okhotnikov S.A.** Mathematical Model and Methods of Analysis of Continuous Contours Images / S.A. Okhotnikov, R.G. Khafizov, M.A. Egoshin // Image Analysis and Pattern Recognition. State of the Art in the Russian Federation. Series on Language Processing, Pattern Recognition, and Intelligent Systems. Volume 7. – World Scientific Publishing Europe Ltd., Singapore, 2024. – P. 199-232. – https://doi.org/10.1142/9789811267215_0005.

Научные труды в журналах из перечня ВАК РФ

9. **Охотников С.А.** Оценка параметров геометрических искажений контуров изображений / С.А. Охотников // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2023. – № 1, – С. 50-60. – DOI: 10.24412/2221-2574-2023-1-50-60.

10. Метод выделения контура и оценки площади сечения сосудов шеи при ультразвуковом исследовании / **С.А. Охотников**, Р.Г. Хафизов, Е.В. Ким, Д.Г. Хафизов // Медицинская техника. – 2022. – № 4. – С. 33-35.

11. Передискретизация контуров цифровых изображений объектов / **С.А. Охотников**, Р.Г. Хафизов, И.Л. Егошина, Д.Г. Хафизов // Цифровая обработка сигналов. – 2021. – №4. – С.48-51.

12. **Охотников С.А.** Оценка нелинейных искажений контуров изображений объектов, заданных на комплексной плоскости / С.А. Охотников // Телекоммуникации. – 2017. – № 8. – С. 30-35.

13. Хафизов Р.Г. Распознавание непрерывных комплекснозначных контуров изображений / Р.Г. Хафизов, **С.А. Охотников** // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – № 5. – С. 3-9.

14. Анализ травмоопасности путей доступа инструмента к области хирургического интереса при подготовке к проведению лапараскопических операций / **С.А. Охотников**, Р.Г. Хафизов, Д.Г. Хафизов, Ю.Е. Гарипова // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2018. – Т. 82, № 12. – С. 1695-1700. – DOI: 10.1134/S0367676518120104.

15. **Охотников, С. А.** Алгоритм управления деревообрабатывающим станком на основе аппарата контурного анализа изображений / С. А. Охотников // Информационно-управляющие системы. – 2013. – №1 (62)/2013. – С. 11-15.

16. **Охотников С.А.** Применение контурного анализа изображений для решения задач дефектоскопии пиломатериалов / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов Р.Г.,

И.Н. Багаутдинов // Вестник Марийского государственного технического университета. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 2(12). – С. 30-35.

17. Контурная математическая модель электроэнцефалограммы / **Охотников С.А.**, Я.А. Фурман, В.В. Севастьянов, К.О. Иванов, Р.Г. Хафизов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2015. – № 4(28). – С. 26-42.

18. **Охотников С.А.** Система распознавания речи по контурам изображения губ / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов, Т.В. Яранцева // Проектирование и технология электронных средств. – 2016. – № 2, – С. 13-17.

19. Анализ спектров сложных сигналов на базе комплекснозначных дискретно-кодированных последовательностей / **С.А. Охотников**, Р.Г. Хафизов, А.А. Смышляев, Н.С. Виноградов // Проектирование и технология электронных средств. – 2020. – № 3. – С. 3-8.

20. **Охотников С.А.** Применение стереографической проекции для решения задач распознавания контуров изображений / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов, Д.Г. Хафизов // Вестник Марийского государственного технического университета. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2009. – № 3, – С. 36-42.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

21. **Охотников С.А.** Визуализация трехмерного изображения на базе анализа проекций непрерывных контуров / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619044, 05.10.2012 г.

22. **Охотников С.А.** Программный комплекс для исследования непрерывных контуров изображений / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов, Ю.Е. Гарипова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611737, 3.03.2010 г.

23. **Охотников С.А.** Программный комплекс дефектоскопии пиломатериалов и управления деревообрабатывающим станком / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов, Д.Г. Хафизов, И.Н. Багаутдинов, А.Р. Галяутдинов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616592, 23.07.2012 г.

Статьи и материалы конференций

24. **Охотников С.А.** Исследование вопроса быстрой свертки непрерывных контуров видеоизображений / С.А. Охотников // Сборник материалов XIII международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (ПТСПИ-2019). – Владимир, 2019. – С. 204-206.

25. **Охотников С.А.** Исследование вопроса передискретизации контуров видеоизображений / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов // Сборник материалов XIII международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (ПТСПИ-2019). – Владимир, 2019. – С. 207-209.
26. **Охотников С.А.** Методика оценки нелинейных искажений изображений объектов в виде ориентиров / С.А. Охотников // Сборник материалов XIII международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Распознавание - 2017). – Курск, 2017. – С. 270-272.
27. **Охотников С.А.** Реализация алгоритмов обработки непрерывных контуров изображений / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов // Сборник материалов XI международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Распознавание - 2013). – Курск, 2013. – С. 48-50.
28. **Охотников С.А.** Исследование влияния дискретизации на качество различения контуров изображений / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов // Сборник материалов X международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Распознавание - 2012). – Курск, 2012. – С. 48-50.
29. **Okhotnikov S.A.** Matched filtering of continuous contour of image / S.A. Okhotnikov, R.G. Khafizov // 10th International Conference "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies" (PRIA-10-2010): Conference Proceedings. – St. Petersburg, 2010. – Vol. 1. – P. 309-312.
30. **Okhotnikov S. A.** The software for processing continuous complex-valued signals defining the form of flat images / S. A. Okhotnikov // 8th International Conference "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies" (PRIA-8-2007). Conference Proceedings. – Yoshkar-Ola, 2007. – P. 279.
31. **Охотников С.А.** Анализ непрерывных комплекснозначных сигналов, задающих контуры изображений плоских объектов / С.А. Охотников, А.А. Баев // Тезисы докладов Тринадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва: МЭИ, 2007. – Т. 1. – С. 103.
32. **Охотников С.А.** Медианная фильтрация контуров изображений, заданных в комплекснозначном виде / С.А. Охотников // Сборник научных статей по материалам XXIII Международной научно-технической конференции «Медико-экологические информационные технологии – 2020». – Курск, 2020. – С. 190-194.

33. **Охотников С.А.** Особенности гомоморфной фильтрации контуров изображений // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений: материалы XVI Международной научно-технической конференции. – Курск, 2021. – С. 189-191.

34. **Охотников С.А.** Сигма-фильтрация контуров изображений заданных в комплекснозначном виде // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 14-ой международной научно-технической конференции. – Владимир, 2021. – С. 188-190.

35. **Охотников С.А.** Применение непрерывных контуров заданных в комплекснозначном виде для обработки медицинских изображений / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов // Сборник докладов XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» (БИОМЕДСИСТЕМЫ-2010). – Рязань, 2010. – С. 285-288.

36. **Охотников С.А.** Методы и средства обработки непрерывных контуров изображений / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов, Д.Г. Хафизов; Марийский гос. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2011. – 167 с. – Деп. в ВИНТИ 27.05.2011, № 254-B2011.

37. **Охотников С.А.** Обработка изображений в системе информационной поддержки при проведении трансуретальной резекции предстательной железы / С.А. Охотников, Р.Г. Хафизов, Ю.Е. Третьякова // Сборник научных статей «Медицинские приборы и технологии». – 2009. – С. 60-64.

38. **Охотников С.А.** Методика объективного контроля за действиями хирурга / С.А. Охотников, Ю.Е. Гарипова, А.В.Казаринов // Сборник материалов XIV международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Распознавание - 2019). – Курск, 2019. – С. 129-131.

39. **Охотников С.А.** Алгоритм предварительной обработки эндоскопических изображений желудочно-кишечного тракта / С.А. Охотников, А.В. Казаринов, Д.М. Батухтин // Сборник материалов XIV международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Распознавание - 2018). – Курск, 2018. – С. 131-133.

40. **Охотников С.А.** Алгоритм классификации тканей на томографических изображениях органов брюшной полости / С.А. Охотников, А.В. Казаринов, Ю.Е. Гарипова // Сборник материалов XIV международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания

образов, обработки изображений и символьной информации» (Распознавание - 2018). – Курск, 2018. – С. 134-136.

41. **Охотников С.А.** Система информационной поддержки хирурга на базе классификации тканей по их травмоопасности / С.А. Охотников, Ю.Е. Гарипова, А.В. Казаринов // Сборник материалов XIV международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Распознавание - 2018). – Курск, 2018. – С. 84-86.

42. **Охотников, С.А.** Аппаратно-программный комплекс для решения задач дефектоскопии пиломатериалов на основе контурного анализа / С.А. Охотников // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе». – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет: в 2 ч. Ч.1. – 2011. – С. 102-107.

Подписано в печать __.__.2026 г. Формат 60x84 1/16.

Усл.п.л. 2,00. Тираж 100 экз. Заказ № 1780.

Отпечатано в ООО «Вертола»

424004, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Л. Толстого, д. 45.