



На правах рукописи

Магдеев Радик Гильфанович

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ПСЕВДОГРАДИЕНТНЫХ
АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА
БИНАРНЫХ И ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2025

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника, телекоммуникации и защита информации» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Ташлинский Александр Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сергеев Владислав Викторович**,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»,
кафедра геоинформатики и информационной
безопасности, заведующий кафедрой

Диязитдинов Ринат Радмирович,
кандидат технических наук, доцент, АО НПЦ
ИНФОТРАНС, Методико-технологический
департамент, ведущий инженер-методист

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический
университет имени В.Ф. Уткина»

Защита состоится 02 июля 2025 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.422.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный университет», по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, д. 106, корпус 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа — <https://www.ulsu.ru>, с авторефератом — на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации — <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Волков Максим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из ключевых проблем обработки изображений и компьютерного зрения является распознавание образов. Многие методы и алгоритмы обнаружения объектов на изображениях, их идентификации, классификации и слежения уже применяются в коммерческих продуктах, составляя основу систем, решающих сложные задачи обработки изображений. При этом другие методы и возможности их программной реализации находятся в стадии фундаментальных исследований. Необходимость распознавания объектов – как на отдельных изображениях, так и на видеопоследовательностях – возникает в самых разных областях: от военного дела и систем безопасности до оцифровки всевозможных аналоговых сигналов. Отметим только специализированные задачи: поиск изображений по содержанию, оптическое распознавание символов и знаков, оценка положения и параметров искомого объекта. Распознавание объектов на изображении можно определить как возможность отнесения его на основе исходных данных к определённому классу путём сопоставления выделенных существенных признаков, характеризующих данный класс. Основной проблемой при этом является установление соответствия между объектом, выделенным на исследуемом изображении, и эталонным изображением на основе конечного набора определённых свойств и признаков. Данная проблема является одной из фундаментальных проблем методов распознавания, классификации и идентификации.

Перспективными остаются подходы и методы, основанные на сравнении исследуемого изображения объекта с эталонным изображением (далее шаблоном). Для них характерны высокая достоверность и универсальность, что позволяет применять разработанные алгоритмы в различных технических приложениях. При этом вся информация, имеющаяся в распоряжении, часто ограничивается выбранной мерой сходства для различных шаблонов. Основными решаемыми задачами являются: обнаружение (проверка изображения объектов интереса или его части на соответствие определённым условиям), распознавание (нахождение одного или нескольких предварительно заданных объектов (классов объектов) на изображении) и идентификация (распознавание на изображении объекта с оценкой его параметров и принятием решения). Решение всех указанных задач требуют задания математической модели объекта. Данное исследование направлено на разработку и математическое моделирование адаптивных алгоритмов идентификации объектов. При этом под идентификацией объекта понимается распознавание объекта с использованием эталонного изображения с оценкой его местоположения и заданных геометрических параметров.

Степень разработанности темы исследования

Методы идентификации объектов развиваются как российскими^{1,2,3} и др.,

¹ Data Science и интеллектуальный анализ данных : учебное пособие / Д. М. Назаров, С. В. Бегичева, Д. Б. Ковтун, А. Д. Назаров. – Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 304 с.

² Борисова И. В. Компьютерное зрение. Цифровая обработка и анализ изображений : учеб. пособие – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – 163 с.

³ Андриянов, Н. А. Обнаружение объектов на изображении: от критериев Байеса и Неймана-Пирсона к детекторам на базе нейронных сетей / Н. А. Андриянов, В. Е. Дементьев, А. Г. Ташлинский // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1.

так и зарубежными^{4,5,6} и др. исследователями. Основными требованиями, которые предъявляются к методам идентификации, являются робастность, локализация и вычислительная простота.

При обнаружении и распознавании объектов в последнее время очень широкое распространение получили нейронные сети^{7,8,9}. В частности, методы глубокого обучения нейронных сетей легко справляются с распознаванием объектов интереса. Однако с обнаружением и одновременным оцениваем геометрических параметров объекта и его местоположения на сцене возникают проблемы¹⁰, связанные, как правило, с ограниченными объемами баз изображений для обучения сетей и высокими вычислительными затратами на их обучение. Поэтому в работе использовался классический аналитический подход, в котором можно выделить методы, основанные на корреляционно-экстремальном подходе^{11,12}, на анализе признаков^{13,14}, контурном анализе^{15,16,17}, на сведении плоских объектов к графу^{18,19}, на анализе реперных точек^{20,21} и другие. Особенностью указанных методов является то, что шаблон представлен некоторыми атрибутами объекта: внешний контур, остов, реперные точки и другие

⁴ Computer Vision Dan Pengolahan Citra Digital / F. Marpaung, F. Aulia, N. Suryani SKom, R. Cyra Nabila SKom // Surabaya, Jawa Timur : PUSTAKA AKSARA, 2022. – 169 с.

⁵ Gonzalez R. C. Digital Image Processing / R.C. Gonzalez and R.E. Woods, New York: Pearson Education, 2018 – 1022 с.

⁶ Transformers in Vision: A Survey / S. Khan, M. Naseer, M. Hayat, S. W. Zamir et al. // ACM Comput. Surv. – Vol.54 – № 10s – Article 200 – 41 p.

⁷ Jocher G. YOLO by Ultralytics / G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/ultralytics/yolov5/releases> (25.02.2024).

⁸ Blendowski, M. Combining MRF-based deformable registration and deep binary 3D-CNN descriptors for large lung motion estimation in COPD patients / M. Blendowski, M.P. Heinrich //International journal of computer assisted radiology and surgery. – 2019. – Т. 14. – №. 1. – С. 43-52.

⁹ Diwan T. Object detection using YOLO: challenges, architectural successors, datasets and applications // T. Diwan, G. Anirudh, J.V. Tembhurne // Multimedia Tools and Applications – 2022. -Vol. 82 (6) – P. 9243-9275.

¹⁰ Islam K. A deep learning-based framework for the registration of three dimensional multi-modal medical images of the head / K.T. Islam, S. Wijewickrema, S.O'Leary // Scientific Reports – 2021 - V. 11, №. 1. - P. 1–13.

¹¹ Бобков А. В. Корреляционно-экстремальные методы распознавания изображения : учебно-методическое пособие / Бобков А. В., Палкин М. В. ; МГТУ им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет). - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. - 68 с.

¹² Ковалевский, В.А. Методы оптимальных решений в распознавании изображений – М. : Наука, 1976. – 328 с.

¹³ Abdullazade G. Principles of function identification in data mining (data collection) / G. Abdullazade, F. Gadzhiev // РАНТЕI – 2020 – Vol. 25 (02) – С. 19-27.

¹⁴ Куляс О.Л. Поиск и выделение изображений государственных регистрационных знаков в ТВ системах с видеоаналитикой / О.Л. Куляс, А.С. Лошкарёв // Инфокоммуникационные технологии. – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 207-214.

¹⁵ Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев, А.А. Рожнецов и др.; под ред. Я. А. Фурмана. – 2-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2002. – 592 с.

¹⁶ Устюков, Д. И. Методы и алгоритмы обнаружения объектов на аэрокосмических изображениях с применением комплексного контурного анализа : специальность 05.13.17 "Теоретические основы информатики" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Устюков Дмитрий Игоревич, 2022. – 156 с.

¹⁷ Смольянинов В. А. Программный комплекс обнаружения и распознавания дорожных знаков / В. А. Смольянинов, С. С. Гришунов, Ю. С. Белов // E-Scio. – 2021. – №1 (52). – С 344-353.

¹⁸ Местецкий, Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2009. – 288 с.

¹⁹ Бобенко, С. С. Опорные точки в представлении растровых изображений и метод их поиска / С. С. Бобенко, Н. И. Корсунов, А. И. Титов // Информационные системы и технологии. – 2024. – № 1(141). – С. 24-30.

²⁰ Белов, Н. В. Анализ дескрипторов ключевых точек в компьютерном зрении / Н.В. Белов, В.М. Петухов // Наука, общество, технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации : монография. – Пенза : Наука и Просвещение, 2024. – С. 53-63.

²¹ Self-adaptive SURF for image-to-video matching / M. Yang, J. Li, Zh. Li [et al.] // Signal, Image and Video Processing. – 2024. – Vol. 18, No. 1. – P. 751-759.

признаки. Одной из таких форм является и представление объекта в бинарном виде, что сохраняет форму объекта, масштаб, положение на изображении, но лишь частично внутреннюю структуру. Без предобработки к бинарным изображениям применим корреляционно-экстремальный подход, но он требует больших вычислительных ресурсов и практически не реализуем в системах реального времени. Поэтому разработка быстрых методов идентификации объектов на изображениях, в том числе бинарных, представляет существенный интерес. Основной проблемой при этом является выбор конечного набора некоторых свойств и признаков для установления соответствия между выделенным на исследуемом изображении объектом и шаблоном. Дополнительным мешающим обстоятельством является то, что в результате различных факторов (изменение сцены, движение объекта или фотоприёмной аппаратуры, несовершенства оптических приборов, влияния среды при формировании изображений и пр.) возникают геометрические искажения, вызывающие геометрическое рассогласование между шаблоном и полученным изображением объекта.

Объектом исследований в настоящей работе являются методы и алгоритмы идентификации объекта интереса на изображении. Предметом исследования является метод идентификации объекта на основе математического аппарата псевдоградиентной адаптации.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является повышение эффективности идентификации объектов на бинарных и полутоновых изображениях по шаблону. Под эффективностью понимается уменьшение числа шаблонов при сохранении заданных вероятности обнаружения объекта и точности оценивания его геометрических параметров, что, в свою очередь, приводит к сокращению вычислительных затрат.

Для достижения цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработка нового метода идентификации объектов на изображении, основанного на сравнении изображения объекта с шаблоном, который адаптивно изменяясь по заданному набору параметров идентификации (параметров возможного пространственного рассогласования изображения объекта и эталона), привязывается к изображению объекта в соответствии с заданной целевой функцией (ЦФ) качества идентификации.
2. Разработка новой параметрической математической модели объекта идентификации, способной изменять свою геометрию по заданному набору параметров.
3. Разработка на базе математического аппарата безыдентификационной псевдоградиентной адаптации численной процедуры нахождения параметров идентификации, а также на ее основе – быстродействующих алгоритмов идентификации объекта интереса.
4. Разработка и анализ приемов повышения эффективности псевдоградиентных алгоритмов идентификации объектов на изображениях за счет предобработки исследуемых изображений и совокупности критериев идентификации.
5. Разработка комплекса программ, реализующих псевдоградиентные адаптивные алгоритмы идентификации объектов на бинарных и полутоновых изображениях.
6. Апробация полученных результатов на известных датасетах бинарных и полутоновых изображений, а также на металлографических изображениях.

Методы исследований

При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы теории вероятностей, случайных процессов и полей, математической статистики, численной безыдентификационной адаптации, математического моделирования, статистических испытаний, объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод псевдоградиентной идентификации объектов на изображении (далее МПГИ), основанный на адаптивной привязке по заданному набору параметров шаблона(ов) к изображению исследуемого объекта, и направленный на сокращение числа шаблонов и вычислительных затрат.
2. Разработанная на основе МПГИ математическая модель объекта идентификации, способная изменять свою геометрию по заданному набору параметров.
3. Численная процедура оценивания параметров идентификации, построенная на базе математического аппарата псевдоградиентной адаптации, а также разработанные на ее основе быстродействующие псевдоградиентные алгоритмы идентификации объекта интереса на изображениях.
4. Приёмы предобработки бинарных и полутоновых изображений и совокупность критериев идентификации, направленных на увеличение рабочего диапазона и повышение достоверности идентификации.
5. Комплекс программ, реализующих псевдоградиентные адаптивные алгоритмы идентификации объектов на бинарных и полутоновых изображениях.

Научная новизна результатов

1. Разработан новый метод идентификации объектов на изображении, отличающийся от известных методов адаптивной привязкой шаблона(ов) к изображению идентифицируемого объекта, и направленный на сокращение числа используемых шаблонов и вычислительных затрат.
2. На основе метода предложена новая математическая модель объекта идентификации, способная изменять геометрию шаблона по заданному набору параметров.
3. На базе математического аппарата псевдоградиентной адаптации разработана новая численная процедура оценивания параметров модели объекта идентификации и на ее основе – быстродействующие псевдоградиентные алгоритмы идентификации.
4. Предложена совокупность критериев, основанная на анализе характера сходимости оценок параметров идентификации в процессе псевдоградиентного оценивания, позволяющая повысить достоверность идентификации объектов интереса, схожих по форме, на бинарных и полутоновых изображениях.
5. Разработан комплекс прикладных программ для реализации, моделирования и оценки эффективности разработанного МПГИ. С использованием математического моделирования проведено исследование метода на тестовых бинарных и полутоновых изображениях, подтвердившее его преимущества перед известными подходами, выработаны рекомендации по использованию.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость полученных результатов, обладающих научной новизной, состоит в разработке новых МПГИ, параметрической математической модели объекта идентификации и псевдоградиентной процедуры оценивания параметров идентификации, а также критериев идентификации на основе анализа сходимости оценок параметров идентификации при их псевдоградиентном оценивании, направленных на повышение эффективности идентификации объектов на бинарных и полутоновых изображениях.

Практическая значимость результатов состоит в разработке комплекса алгоритмов и программ, реализующих МПГИ объектов на бинарных и полутоновых изображениях, который может быть использован при решении широкого круга прикладных задач обработки изображений. В частности, разработанный комплекс программ был применен при разработке методики оценивания по металлографическим изображениям параметров микроструктур сталей перлитного класса [16], анализе временной динамики дефектов мостовых сооружений по аэроизображениям с БПЛА [3] и идентификации плавательных средств по спутниковым изображениям [17].

Достоверность и апробация результатов работы

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью математических выкладок и экспериментальными исследованиями, проведенными с помощью разработанного программного обеспечения.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на международных конференциях: «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» (Самара, 2013), «Construction and energy efficiency in the 21st Century – Second Russian-German scientific conference» (Ulyanovsk, 2013), «Научное и техническое творчество молодежи» (Москва, НТТМ-2010 и НТТМ-2013 (отмечена медалью НТТМ), «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, ИТНТ 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения» (Санкт-Петербург, 2015), на всероссийских конференциях: «Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа. Конкурс научно-технического творчества молодежи (НТТМ)» (Ульяновск, 2010, 2015), «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения» (Ульяновск, ИАТУ, 2014), научных сессиях, посвященных дню радио (Москва, 2010, 2012, 2013, 2014, 2020), на всероссийских конференциях «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2009, 2010, 2012, 2013, 2020, 2021, 2022), «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2013, 2014).

Соответствие специальности

Работа соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и охватывает следующие области исследования, входящие в эту специальность: «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» (п. 2), «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения

вычислительного эксперимента» (п. 3) и «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий» (п. 9).

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении грантов РФФИ: 13-01-00555 «Оптимизация и оценка достоверности процедур привязки последовательности цифровых изображений в условиях интенсивных пространственно-коррелированных помех» (исполнитель), 16-47-732053 «Развитие методов безыдентификационного рекуррентного оценивания параметров геометрических деформаций последовательностей изображений применительно к задачам радиолокации, управления автономными беспилотными летательными аппаратами и контроля состояния микроструктуры металлов» (исполнитель), 19-47-730004 «Разработка методики и алгоритмов обработки металлографических изображений для идентификации параметров микроструктуры металла» (руководитель), 19-29-09048 «Построение математических моделей и процедур привязки разнородных цифровых видеоданных на основе глубоких гауссовых моделей и безыдентификационной стохастической адаптации» (исполнитель); гранта РНФ 23-21-00249 «Разработка алгоритмов обнаружения дефектов на изображениях стальных и железобетонных конструкциях» (исполнитель); грантов Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере: по программе «У.М.Н.И.К.» №8773p/14001 и №10122p/16840 «Разработка методики определения степени старения малоуглеродистых сталей (для трубопроводов) по изображениям металла с оптического микроскопа» (руководитель) и по программе «У.М.Н.И.К. на СТАРТ» №12483p/23934 «Разработка алгоритмов цифровой обработки изображений микроструктуры материала» (руководитель), а также при разработке программного обеспечения для ООО «Телеком.ру», ООО «Интегра» и ООО «НПП Русмодуль».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 35 работ, в том числе 5 в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований (3 из которых входят в международные реферативные базы SCOPUS и WOS), 4 публикации опубликованы в журналах, входящих в базу данных RSCI, 10 – в материалах конференций, индексируемых в SCOPUS, получены 4 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Личный вклад автора

В приведенных в автореферате публикациях автору принадлежит следующий вклад. В работах [1, 11] предложена численная процедура нахождения параметров идентификации на основе МПГИ, проведен экспериментальный сравнительный анализ ее эффективности, метода контурного анализа и корреляционно-экстремального метода на бинарных изображениях. В работе [2] предложена новая математическая модель объекта идентификации, и для оценки эффективности идентификации предложен комплексный критерий. В работе [3] МПГИ применен для анализа динамики дефектов мостовых конструкций по разновременным изображениям, полученным с использованием БПЛА. В работах [4, 22] – вычислительный и экспериментальный

сравнительный анализ процедур построения выпуклой оболочки, и апробация реализованных алгоритмов на металлографических изображениях. В работе [5] выполнены экспериментальные исследования, на основе которых найдено пороговое значение принятия решения об идентификации при использовании МПГИ, а также предложены дополнительные критерии идентификации. В работах [6 – 8] – программная реализация алгоритмов на основе МПГИ, направленных на оценивание параметров металлографических изображений. В работе [10] – разработка алгоритма идентификации перлита на металлографических изображениях, направленного на определение доли зернистой фазы в перлите. В работах [12, 16] – использована новая математическая модель объекта идентификации на основе МПГИ и разработана методика оценки параметров микроструктур сталей по металлографическим изображениям. В работе [13] предложена и программно реализована численная процедура нахождения параметров идентификации для выделения перлита на изображениях микрошлифов сталей на основе МПГИ. В работах [14, 18] предложены процедуры предобработки изображений, расширяющие рабочий диапазон МПГИ на бинарных и полутоновых изображениях, проведены экспериментальные исследования по оптимизации размеров масок низкочастотных фильтров. В работе [15] получены пороговые значения для критериев при идентификации объектов схожей формы, обоснована необходимость использования дополнительных критериев при идентификации по бинарным изображениям. В работе [17] апробировано использование МПГИ для идентификации плавательных средств по спутниковым изображениям. В работе [19] получены экспериментальные данные для сравнительного анализа вариантов реализации МПГИ при использовании различных ЦФ идентификации объектов на полутоновых изображениях. В работах [20, 21] МПГИ апробирован для решения задачи поиска областей, в которых произошли изменения при анализе разновременных изображений зданий и мостовых сооружений. В работе [23] получены экспериментальные данные по сходимости оценок параметров идентификации при анализе разновременных изображений мостовых конструкций, выработаны рекомендации для предобработки таких изображений. В отмеченных работах, а также в работах, не вошедших в число основных публикаций, более шестидесяти процентов выполненных исследований принадлежит соискателю лично.

Структура и объем диссертации

Основное содержание диссертационной работы изложено на 193 страницах машинописного текста, в том числе 149 страниц основного текста. Диссертация содержит 95 рисунков, 7 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 200 наименований и 3-х приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения об использовании, реализации и апробации результатов работы, о структуре диссертации.

В первой главе проведен сравнительный анализ известных методов идентификации объектов на изображениях, основанных на сравнении с эталоном, рассмотрены основные этапы и характеристики качества идентификации, проанализированы проблемы идентификации в сложных условиях, предложен новый метод идентификации объектов на базе аппарата псевдоградиентной адаптации шаблона(ов) к изображению объекта и сформулированы основные задачи исследований диссертационной работы.

Рассмотрены методы идентификации, в которых сравнение происходит непосредственно с шаблоном, и признаковые методы, в которых результат основан на получении признаков объекта и сравнении их с признаками шаблонов (сюда же можно отнести методы, в которых сравниваются некие образы, выделенные из шаблона и исследуемого объекта). Рассмотрены методы корреляционно-экстремальный (КЭМ), на основе сопоставления признаков, контурного анализа (МКА), основанные на сведении плоских объектов к графу, на обнаружении устойчивых признаков изображения, на сравнении отрезков. Ни один из исследованных методов не удовлетворяет комплексу требований: робастности (устойчивость к значительным искажениям), локализации (способность не только обнаруживать объект, но и указывать его положение) и вычислительной простоты. Выявлено, что наиболее подходящими для сравнительного анализа эффективности предложенных решений для достижения поставленной в диссертации цели являются КЭМ и МКА.

Большинство подходов к распознаванию объектов на изображениях основано на сравнении шаблона с выделенным объектом исследования. При этом для разделения объектов друг от друга и от фоновой составляющей используется сегментация. Поэтому достаточное внимание уделено анализу алгоритмов сегментации объектов на изображении. Проанализированы алгоритмы, направленные на выделение контурных линий (отслеживающие, сканирующие, использующие морфологические свойства изображений) и на выделение фигур (пороговой обработки, выделения связанных областей). Анализ показал, что для решения поставленных задач наиболее приемлемым является использование последовательных отслеживающих алгоритмов, направленных на выделение контурных линий. Проведенный анализ определил цель и задачи диссертационной работы, а также область апробации полученных результатов.

Предложен новый МПГИ объектов на изображении, основанный на сравнении изображения объекта с шаблонами возможных классов объектов, которые адаптивно изменяясь по некоторому набору параметров идентификации, привязываются к изображению объекта. При этом набор параметров (значения которых рекуррентно оптимизируются по заданному критерию качества) задается априорно. Рассмотрен подход к оцениванию параметров идентификации шаблона на базе аппарата псевдоградиентной адаптации. В частности, проанализированы процедуры оценивания параметров, проведен выбор целевых функций и вида псевдоградиента. Показано, что требованиям простоты, эффективной сходимости и работоспособности при изменениях влияющих факторов удовлетворяют релейные безидентификационные процедуры.

Отмечены недостатки²² псевдоградиентного подхода, которые должны учитываться при построении процедур идентификации.

Во второй главе на основе МПГИ предложена новая математическая модель объекта идентификации, разработаны быстродействующие численные алгоритмы идентификации, исследованы возможности повышения эффективности МПГИ при обработке бинарных изображений за счет их предварительной низкочастотной фильтрации и использования совокупности критериев идентификации. Проведен сравнительный анализ разработанного метода с КЭМ и МКА.

Модель объекта идентификации при традиционном подходе (при одном классе объектов) – это множество $\{Z^{m1}, Z^{m2}, \dots, Z^{mk}\}$ изображений объекта, которые поочередно по заданному критерию качества идентификации сравниваются с наблюдаемым изображением объекта Z^o . Мощность множества определяется требуемой точностью нахождения параметров идентификации (дискретностью изменения параметров идентификации). Изображение шаблона, соответствующее экстремуму ЦФ качества идентификации, и определяет параметры идентификации.

Предложенный в первой главе МПГИ порождает новую математическую модель объекта идентификации: адаптивный шаблон $Z^{ma} = f(Z^m, \vec{\alpha}, Z^o)$, параметры которого определяются численной процедурой псевдоградиентной адаптации, где: Z^m – заданный шаблон объекта; $\vec{\alpha}$ – параметры идентификации; Z^o – наблюдаемое изображение объекта. В частности, при использовании модели подобия

$$Z^{ma} = [z_{i,j}^{ma}]_{I \times J} = [\tilde{z}^m(x', y')]_{I \times J}, \quad (1)$$

где Z^{ma} – шаблон объекта, передискретизированный в соответствии с параметрами h_x, h_y, φ и κ модели; $z_{i,j}^{ma}$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$ – отсчеты Z^{ma} ; $I \times J$ – размер шаблона; $\tilde{z}^m(x', y')$ – значение яркости в узле (i, j) , полученное с использованием некоторой интерполяции по Z^m ; (i, j) – координаты сетки отсчетов Z^{ma} ; $(x' = \kappa \cdot x \cdot \cos \varphi - \kappa \cdot y \cdot \sin \varphi + h_x, y' = \kappa \cdot x \cdot \sin \varphi + \kappa \cdot y \cdot \cos \varphi + h_y)$ – координаты узла (i, j) изображения Z^{ma} на изображении Z^m при параметрах h_x, h_y, φ и κ . Примечание: h_x, h_y – в шагах сетки отсчетов исследуемого изображения объекта. Например, при использовании билинейной интерполяции:

$$\begin{aligned} \tilde{z}^m(x', y') = & z_{(i-1, j-1)}^m + (x' - i - 1) \left(z_{(i+1, j-1)}^m - z_{(i-1, j-1)}^m \right) + (y' - j - 1) \left(z_{(i-1, j+1)}^m - z_{(i-1, j-1)}^m \right) + \\ & + (x' - i - 1)(y' - j - 1) \left(z_{(i+1, j+1)}^m + z_{(i-1, j-1)}^m - z_{(i+1, j-1)}^m - z_{(i-1, j+1)}^m \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Численная процедура идентификации для каждого класса объектов включает три последовательных операции:

²² Tashlinskii, A. G. Optimization of Goal Function Pseudogradient in the Problem of Interframe Geometrical Deformations Estimation / A.G. Tashlinskii // Pattern Recognition Techniques, Technology and Applications. – London, United Kingdom. – 2008. P. 249-280.

1) Оценивание вектора параметров идентификации $\vec{\alpha}$ с использованием адаптивной псевдоградиентной процедуры (ППП):

$$\hat{\vec{\alpha}}_t = \hat{\vec{\alpha}}_{t-1} - \Lambda_t \text{Sign } \vec{\beta}(Q(\hat{\vec{\alpha}}_{t-1}, \mathbf{Z}^{\text{ш}}, \mathbf{Z}^{\text{о}})), \quad (3)$$

где $\vec{\beta}(Q(\cdot))$ – псевдоградиент ЦФ $Q(\cdot)$; $\mathbf{Z}^{\text{ш}}$ – шаблон; $\mathbf{Z}^{\text{о}}$ – изображение объекта интереса; $t = \overline{1, T}$ – номер итерации; Λ_t – диагональная матрица усиления (в частности, при модели подобия $\Lambda_t = \bar{\lambda} \mathbf{I}_4$, $\bar{\lambda} = (\lambda_{hx}, \lambda_{hy}, \lambda_{\varphi}, \lambda_{\kappa})^T$, $\mathbf{I}$ – единичная матрица). При этом для нахождения $\vec{\beta}(Q(\cdot))$ используется не все отсчеты $\mathbf{Z}^{\text{ш}}$ и $\mathbf{Z}^{\text{о}}$, а лишь малая их часть – локальная выборка.

2) Вычисление расчетных значений критериев идентификации (рассмотрены ниже):

2.1) R – коэффициента корреляции между $\mathbf{Z}^{\text{о}}$ и $\mathbf{Z}_T^{\text{ша}}$, где $\mathbf{Z}_T^{\text{ша}}$ – изображение адаптивного шаблона на T -й (конечной) итерации ППП;

2.2) $\hat{m}^Q$ – оценка мат. ожидания ЦФ $Q(\cdot)$ в установившемся режиме (последние K итераций);

2.3) $\hat{\sigma}^Q$ – оценка среднеквадратического отклонения (СКО) ЦФ $Q(\cdot)$ в установившемся режиме.

3) Сравнение расчетных значений критериев идентификации с пороговыми: если $R > R_{\text{пор}}$, $\hat{m}^Q < m_{\text{пор}}^Q$ и $\hat{\sigma}^Q < \sigma_{\text{пор}}^Q$, то гипотеза об идентификации объекта интереса с геометрическими параметрами $\vec{\alpha}_T$ принимается.

В качестве ЦФ в работе использовались средний квадрат разности яркостей (СКРЯ) и коэффициент корреляции яркостей (ККЯ) $\mathbf{Z}^{\text{о}}$ и $\mathbf{Z}^{\text{ша}}$.

Принятие гипотезы об идентификации объекта предполагает сравнение расчетного значения критерия с пороговым. Исследование показало, что при этом плотности распределения вероятностей корреляций для пар «деформированный и соответствующий ему исходный» шаблоны и «деформированный и другой» шаблоны близки к нормальному закону распределения. Поэтому пороговое значение можно искать исходя из Байесовского критерия. Оптимальным выбором порога принят такой, при котором сумма вероятностей ошибки первого и второго рода минимальна. Для примера на рисунке 1 для бинарного шаблона представлены гистограммы p_i оценок математического ожидания $m_{\Delta Z}$ разности яркостей ΔZ для пар «деформированный и тот же исходный» шаблоны (рисунок 1а) и «деформированный и другой» шаблоны (рисунок 1б) для $i = \overline{-90, 90}$, где $i = \text{int}[\Delta Z]$. Пороговые значения искали по разработанной методике на основе экспериментальных данных. При этом было использовано 250 случайно взятых шаблонов, а мерой сходства изображений выбрана их взаимная корреляция. Аналогичные результаты получаются и для полутоновых изображений.

Однако при схожих шаблонах использование одного критерия для решаемой задачи не обеспечивает высокой достоверности идентификации объектов, особенно бинарных.

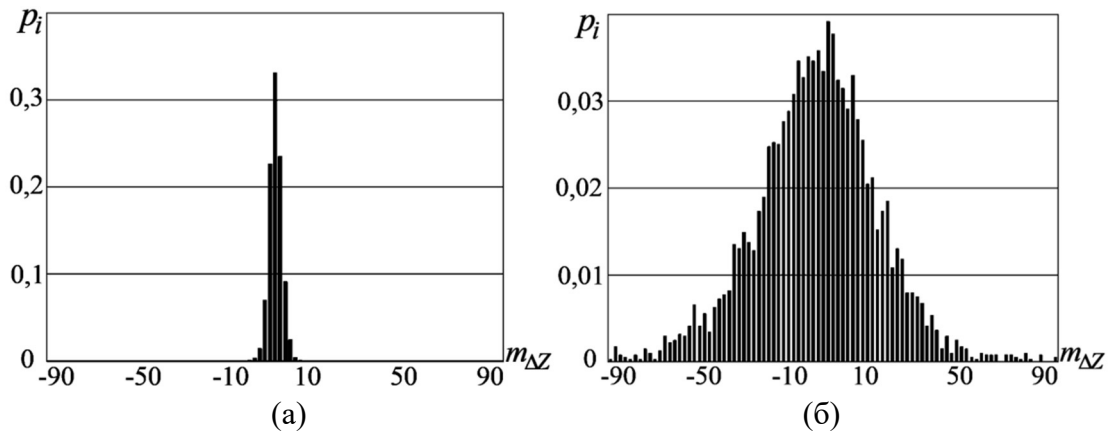


Рисунок 1 – Гистограммы оценок математического ожидания разности яркостей

Для уменьшения вероятности ложной идентификации объектов предложено использование дополнительных критериев, основанных на анализе процесса сходимости параметров идентификации. Используются усреднённые оценки математического ожидания $\hat{m}^Q$ и СКО $\hat{\sigma}^Q$ оценок ЦФ на итерациях сходимости.

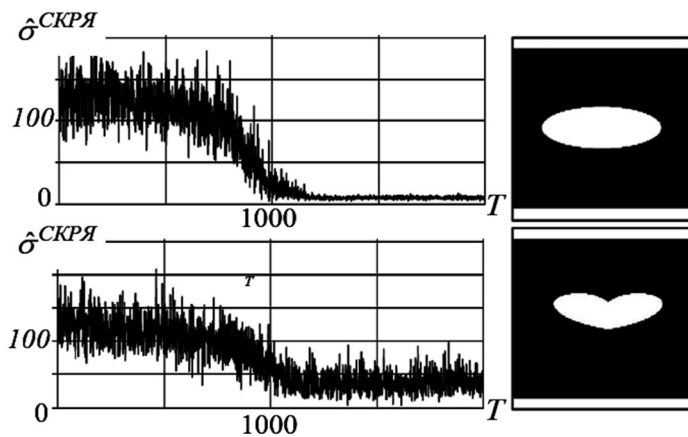


Рисунок 2 – Пример сходимости СКО разностей яркостей для «правильного» и другого шаблонов

качестве «другого шаблона» – шаблон «Сердце» (датасет²³). При этом при исследуемом изображении «Овал» шаблон «Сердце» показал корреляцию 0,97 при пороге 0,943. Однако идентификация объекта не прошла по дополнительным характеристикам (для $\hat{m}^{СКРЯ}$ получилось 38.1 при пороге 9,5, а для $\hat{\sigma}^{СКРЯ}$ – 24.3 при пороге 4,6).

Упрощенный алгоритм псевдоградиентной идентификации объектов N классов при выборе в качестве ЦФ ККЯ, а в качестве параметров модели возможных геометрических деформаций изображения объекта $\bar{\alpha}_{M_k}$, приведен ниже.

- 1⁰. Задание библиотеки шаблонов $\{Z_1^{\text{ш}}, Z_2^{\text{ш}}, \dots, Z_N^{\text{ш}}\}$ (один шаблон $Z_i^{\text{ш}}$ для каждого i -го класса объектов, $i = \overline{1, N}$).
- 2⁰. Формирование из каждого шаблона $Z_i^{\text{ш}}$ подшаблонов $Z_{ik}^{\text{ш}}$ в соответствии с рабочим диапазоном ППП, где $k = \overline{1, M_i}$.

²³ Image Databases [Электронный ресурс] – Заглавие с экрана. – Режим доступа: <http://www.imageprocessingplace.com/>

- 3⁰. Загрузка исследуемого изображения объекта $\mathbf{Z}^o$.
- 4⁰. Для каждого M_k -го подшаблона i -го шаблона:
 - 4.1⁰. Задание начальных параметров идентификации для ППП: $\vec{\alpha}_{mk,0}$.
 - 4.2⁰. Выполнение $t = \overline{1, T}$ итераций:
 - формирование адаптивного шаблона: $\mathbf{Z}_{ik,t}^{\text{ш}}(\hat{\alpha}_{ik,t-1}^{\text{ш}}, \mathbf{Z}^o)$;
 - вычисление по локальной выборке $\vec{\beta}(Q(\hat{\alpha}_{ik,t-1}^{\text{ш}}, \mathbf{Z}_{ik,t}^{\text{ш}}, \mathbf{Z}^o))$ ККЯ;
 - нахождение в соответствии с (3) оценок параметров идентификации $\hat{\alpha}_{ik,t}^{\text{ш}}$.
 - 4.3⁰. Определение оценок параметров идентификации $\hat{\alpha}_{ik,T}^{\text{ш}}$.
 - 4.4⁰. Нахождение расчетных значений R_{ik} , $\hat{m}_{ik}^{\text{ККЯ}}$ и $\hat{\sigma}_{ik}^{\text{ККЯ}}$.
- 5⁰. Выбор $\max R_{ik}^{\text{ККЯ}}$ и сравнение его с $R_{\text{пор}}$, сравнение $\hat{m}_{ik}^{\text{ККЯ}}$ и $\hat{\sigma}_{ik}^{\text{ККЯ}}$ с $m_{\text{пор}}^{\text{ККЯ}}$ и $\sigma_{\text{пор}}^{\text{ККЯ}}$.
- 6⁰. Если $R_{ik} > R_{\text{пор}}$, $\hat{m}_{ik}^{\text{ККЯ}} < m_{\text{пор}}^{\text{ККЯ}}$ и $\hat{\sigma}_{ik}^{\text{ККЯ}} < \sigma_{\text{пор}}^{\text{ККЯ}}$, то идентифицирован i -й эталон с параметрами $\hat{\alpha}_{ik,T}^{\text{ш}}$.

По сравнению с полутоновыми изображениями при обработке бинарных изображений ППП (3) имеет существенно меньший рабочий диапазон. Показано, что его расширения можно достичь за счет низкочастотной фильтрации. Проанализированы сглаживающие низкочастотные фильтры: усредняющий фильтр, фильтр треугольной формы и фильтр Гаусса. С использованием коллекции тестовых бинарных изображений²⁷ по предложенному комплексному критерию, учитывающему скорость сходимости ППП, устойчивость результатов фильтрации к форме объекта и рабочий диапазон, были найдены оптимальные размеры масок исследуемых фильтров, составившие соответственно: 6% (усредняющий фильтр), 9% (треугольный фильтр) и 11% (фильтр Гаусса) от размера объекта. Исследования проводились для 200 бинарных шаблонов, которые были подвергнуты искусственным искажениям, дополнительно для каждого шаблона использовалось также 5 ближайших по схожести форм объекта шаблонов (далее “другие шаблоны”). Показано, что с учетом высокого быстродействия и отсутствия осцилляций для повышения эффективности псевдоградиентного оценивания параметров взаимных геометрических рассогласований исследуемого изображения и шаблона может быть рекомендован фильтр Гаусса. Рисунок 3 иллюстрирует скорость сходимости СКО $\hat{\sigma}^{\text{СКРЯ}}$ при идентификации бинарных (верхний график) и отфильтрованных (нижний график) изображений. Рассогласование объекта и шаблона составляло 11 шагов сетки отсчетов, угол поворота 10 градусов. Скорость сходимости $\hat{\sigma}^{\text{СКРЯ}}$ оценивалась по локальной выборке объемом по 29 отсчетов исследуемого изображения и шаблона.

Аналогичные зависимости для полутоновых изображений, полученные с использованием датасета полутоновых изображений²⁴, приведены на рисунке 4. Видно, что выигрыш в скорости сходимости параметров идентификации здесь также существенный (примерно в 6 раз), но он меньше, чем для бинарных изображений (более 10 раз).

²⁴ Nene, S.A Columbia Object Image Library (COIL-20) / S.A. Nene, S.K. Nayar, H. Murase [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/software/soflib/coil-20.php>

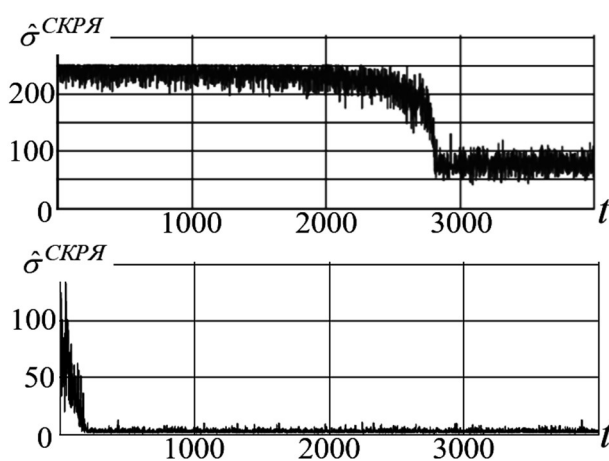


Рисунок 3 – Сходимость оценок
СКО разностей яркостей

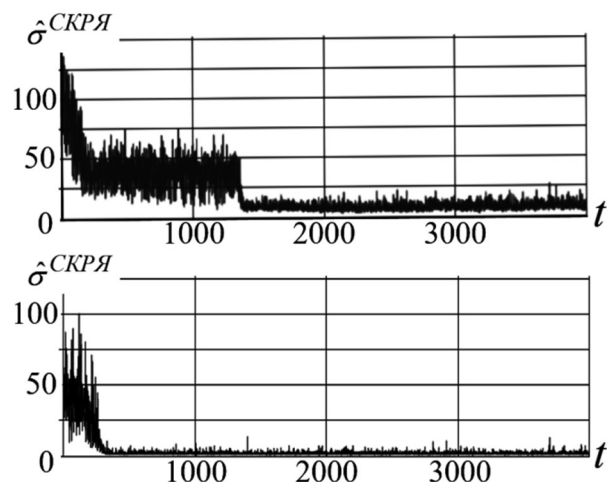


Рисунок 4 – Сходимость оценок
СКО разностей яркостей

Дополнительной возможностью повышения эффективности ПГП при полутоновых изображениях является способ выбора отсчетов для локальной выборки. Он заключается в случайном выборе отсчетов только в окрестности границ объекта, а не на всём его изображении. Такие отсчеты после фильтрации имеют ненулевой градиента яркости, что увеличивает эффективность ПГП. Исследования показали, что число итераций при этом дополнительно снижается на 15-20%.

Использование для идентификации объекта большого числа подшаблонов (по сути, начальных приближений параметров идентификации) ведет к пропорциональному увеличению времени обнаружения. При этом число подшаблонов зависит от соотношения рабочей области ПГП и области определения возможного изменения параметров. Рассмотрено два подхода к сокращению числа подшаблонов: предварительная сегментация объектов на исследуемых изображениях и учёт симметрии эталонов. Первый подход позволил на тестовых бинарных изображениях²⁷ снизить число подшаблонов в среднем в 10,6 раза, а второй для разных объектов – от 1,5 до 5 раз. В совокупности это позволило увеличить быстродействие алгоритма идентификации в более чем в 20 раз.

Для бинарных изображений также проведен сравнительный анализ предложенного МПГИ с КЭМ и МКА для ситуации, когда возможные деформации идентифицируемого объекта относительно шаблона можно свести к модели подобия. Анализ показал, что вычислительная сложность (под которой понималось число элементарных операций) методов по-разному зависит от размеров изображения и объекта. При относительно небольших размерах изображения меньшую вычислительную сложность обеспечивает МКА, при больших – МПГИ. Вычислительная сложность КЭМ как в пространственной, так и в частотной областях имеет квадратичную зависимость от размера изображения и примерно на два порядка выше. Вычислительная сложность методов МКА, МПГИ и КЭМ в частотной области слабо зависит от размера объекта, тогда как для КЭМ в пространственной области наблюдается примерно квадратичная зависимость. Наименьший объем вычислений требует МПГИ, наибольший – КЭМ. Пример полученных зависимостей вычислительной сложности W исследованных методов от размера изображения L_x приведен на рисунке 5. Здесь (а также на рисунках 6 и 7)

кривая 1 соответствует КЭМ в пространственной области, кривая 2 – КЭМ в частотной, кривая 3 – МКА; кривые 4 и 5 – МПГИ при выборе в качестве ЦФ СКРЯ и ККЯ соответственно.

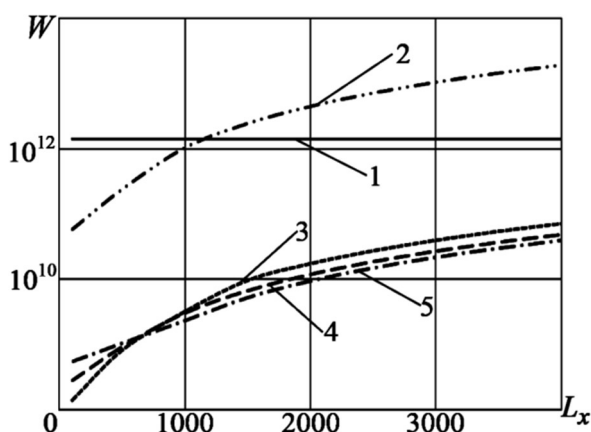


Рисунок 5 – Зависимость вычислительной сложности методов от размера изображения

Лучшую помехоустойчивость благодаря большому объему выборки имеет КЭМ в пространственной области. Здесь погрешность идентификации обусловлена в основном величиной шага изменения параметров идентификации. Хорошую помехоустойчивость обеспечивает также МПГИ. Однако вероятность правильной идентификации в этом методе зависит от рассогласования местоположений искомого объекта и эталона. Вероятность $P_{\text{ош}}$ ложной идентификации при использовании МКА в условиях шумов в несколько раз выше из-за ошибок при выделении контуров.

Пример графиков зависимости $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал/шум $g = 6$ (по дисперсиям) приведены на рисунке 6, а на рисунке 7 – зависимости интегрального критерия эффективности²⁵: $\mathfrak{R} = W \cdot P_{\text{ош}}$ от размера изображения при том же отношении сигнал/шум. Видно, что лучшее значение критерия имеет МПГИ.

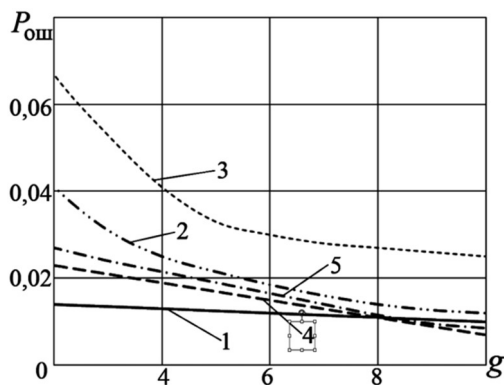


Рисунок 6 – Зависимость вероятности ложной идентификации от отношения сигнал/шум

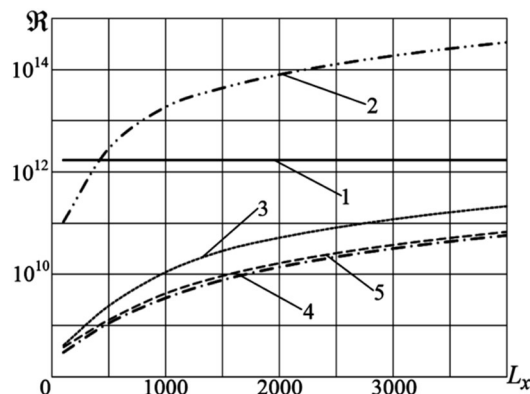


Рисунок 7 – Зависимость интегрального критерия эффективности от размера изображения

Третья глава посвящена исследованию возможностей параметрической оптимизации МПГИ и результатам апробации псевдоградиентных алгоритмов идентификации на бинарных и полутоновых изображениях.

Рассмотрены возможности параметрической оптимизации исследуемых методов по минимуму интегрального критерия эффективности. Оптимизируемым параметром для КЭМ был шаг изменения местоположения искомого объекта, определяющий его

²⁵ Симанков, В.С. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов / В.С. Симанков, Е.В. Луценко – Краснодар: ТУ КубГТУ, 1999. – 318 с.

быстродействие и точность, для МКА – длина контур-вектора, для МПГИ – число подшаблонов (начальных приближений параметров идентификации) при условии не превышения вероятностью ложной идентификации заданного порога. Показано, что наилучшую эффективность с точки зрения интегрального критерия также обеспечивает МПГИ. При этом применение ККЯ в качестве целевой функции, в отличие от СКРЯ, обеспечивает значительно более широкое покрытие рабочей области МПГИ в пространстве искомых параметров.

Приведены результаты апробации псевдоградиентных алгоритмов, реализующих МПГИ на полутоновых и бинарных изображениях. В частности, для полутоновых изображений алгоритмы применялись для идентификации плавательных средств по спутниковым изображениям. При этом была использована библиотека изображений плавательных средств, для каждого из которых создан шаблон и определен пространственный размер объекта [17]. Пример результатов приведен на рисунке 8а, где объект «А» идентифицирован как средство типа «Баржа», а объект «Б» – типа «Сухогруз». Другим примером может служить применение разработанных алгоритмов для анализа динамики дефектов мостовых конструкций по разновременным изображениям, полученным с использованием БПЛА [3]. Пример выявления динамики изменения дефекта (трещины в стальной конструкции) приведен на рисунках 8б-д, где б) шаблон (предыдущее изображение), в) анализируемое изображение, г) трещина в шаблоне, д) выявленная динамика изменения трещины.

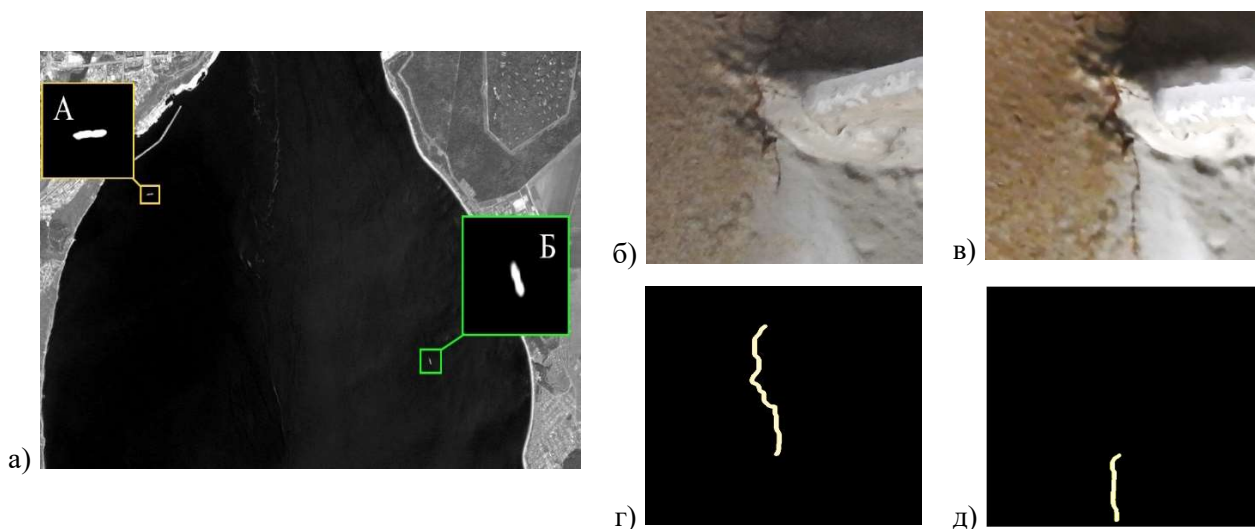


Рисунок 8 – Примеры идентификации объектов на полутоновых изображениях

Более сложным случаем является идентификация объектов на бинарных изображениях, которая, как правило, требует процедур предобработки изображений. Примером применения этих алгоритмов к бинарным изображениям служит разработанная методика автоматизированной оценки параметров микроструктур сталей перлитного класса по металлографическим изображениям, функционирующая в режиме реального времени. Свойства сталей²⁶ определяются их микроструктурой, химическим

²⁶ Взаимосвязь микроструктуры с ударной вязкостью металлов сварного шва трубных высокопрочных низколегированных сталей (обзор исследований) / Ю. И. Карлина, Р. В. Кононенко, В. В. Иванцовский [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 129-154.

составом, а также способами получения и обработки. Разработанную методику можно разделить на три этапа.

1) *Предварительная обработка исследуемых изображений*, направленная на увеличение точности и достоверности нахождения микроструктурных параметров. Содержит операции: сокращение цветности изображения в соответствии с моделью YUV в рекомендациях ITU-R BT.601, выделение области обработки изображения для уменьшения требований к вычислительным ресурсам, медианную фильтрацию изображений для устранения яркостных искажений (размер окна фильтрации 3x3 и 5x5), выравнивание освещенности изображения для компенсации неравномерности освещения микрошлифа, вызванной, например, тенью, эквализация изображения для выравнивания гистограммы яркостей.

2) *Выделение на металлографических изображениях областей, соответствующих перлиту*. Для этой цели используется метод Region Growing²⁷ (выращивания областей) с предварительной обработкой, состоящей из бинарной сегментации и морфологической обработки изображения. Морфологическое замыкание, в частности, используется для устранения объектов, меньших заданного размера окна, и заполнения разрывов внутри перлитных областей. Выделение отдельных областей перлита производится с использованием метода выращивания областей. Выделение границ перлитных областей достигается рекурсивным алгоритмом SBF²⁸. Для построения их выпуклых оболочек выбран алгоритм Quick Hull²⁹. Геометрические характеристики выпуклых оболочек и используются при оценке микроструктурных параметров.

3) *Оценивание микроструктурных параметров*. В соответствии с МПГИ параметры шаблонов подстраиваются под параметры перлитных областей, представленных выпуклыми оболочками. Шаблоном для перлитных областей в соответствии с ГОСТ Р 54570-2011 является эллипс. В качестве априорной информации использовалась площадь каждой выделенной выпуклой оболочки на изображении. Для увеличения рабочего диапазона алгоритма идентификации использована гауссова фильтрация выпуклых оболочек. В качестве математической модели адаптивного шаблона при его привязке к выпуклой оболочке использована модель, являющаяся частным случаем аффинной:

$$\tilde{x} = x_0 + \kappa((x - x_0) \cos \varphi - k(y - y_0) \sin \varphi) + h_x, \quad \tilde{y} = y_0 + \kappa((x - x_0) \sin \varphi + k(y - y_0) \cos \varphi) + h_y, \quad (4)$$

где в качестве адаптивных параметров идентификации использованы коэффициенты масштаба κ , коэффициент эллиптичности k , параллельный сдвиг $\bar{h} = (h_x, h_y)$, угол φ направленности и координаты центра поворота (x_0, y_0) ; $(\tilde{x}, \tilde{y})$ – координаты точки (x, y)

²⁷ Gonzalez R. C. Digital Image Processing / R.C. Gonzalez and R.E. Woods, New York: Pearson Education, 2018 – 1022 с.

²⁸ Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков и др. – М. : Физматкнига, 2010. – 672 с.

²⁹ Barber, C.B. The quickhull algorithm for convex hulls / C.B. Barber, D.P. Dobkin, H. Huhdanpaa // ACM Transactions on Mathematical Software. – 1996. – Vol. 22(4). – P. 469–483.

исходного шаблона при текущих параметрах идентификации. Для примера на рисунке 9 представлены гистограммы распределения областей перлита по коэффициенту анизотропности формы (рисунок 9а) и углу направленности (рисунок 9б).

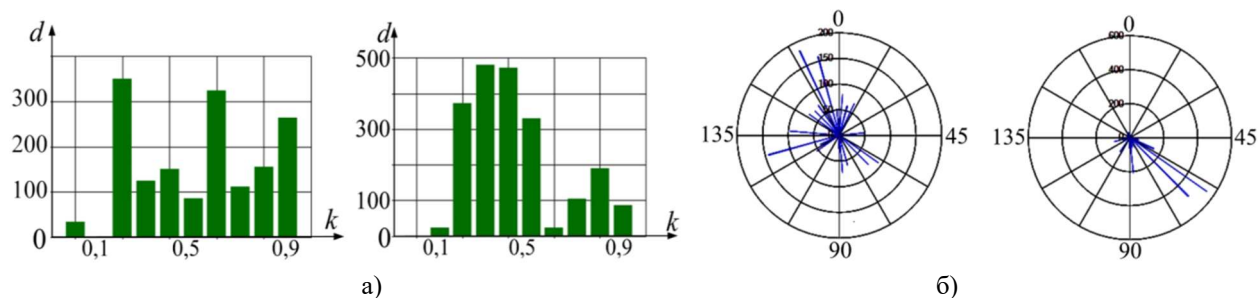


Рисунок 9 - Гистограммы коэффициента анизотропности формы и угла направленности

Проведенные исследования показали, что средние размеры перлитных областей, автоматизировано найденные с использованием рассмотренной методики и рассчитанные по традиционным методам ГОСТ 5639, отличаются не более чем на 5 %. Методика направлена на определение прочностных характеристик металла на разных стадиях производства и эксплуатации. Ее апробация на изображениях микрошлифов нефтяных и водных трубопроводов различного срока эксплуатации показала высокую эффективность.

***Четвертая глава** посвящена разработке алгоритмического обеспечения и комплекса программ для реализации и оценки эффективности разработанного МПГИ.*

Разработано алгоритмическое обеспечение для исследования и анализа эффективности использования в качестве целевых функций СКРЯ и ККЯ, и оптимизации МПГИ объектов на бинарных и полутоновых изображениях, а также для основных этапов методики оценивания на основе МПГИ параметров микроструктур сталей перлитного класса по металлографическим изображениям. На базе алгоритмического обеспечения написаны соответствующие модули программ, объединенные в единый комплекс, включающий 32 модуля. Комплекс программ условно можно разделить на два блока: блок программ для решения задач моделирования исследуемых объектов по заданным шаблонам, сегментации и идентификации объектов на изображении, и блок, направленный на решение задач оценки микроструктурных параметров по металлографическим изображениям. Последний реализует этапы предварительной обработки металлографического изображения, выделение областей, соответствующих перлиту и оценивание микроструктурных параметров.

Программные модули комплекса реализованы на языке C# с применением объектно-ориентированного подхода в среде разработки Microsoft Visual Studio. Они являются частью библиотеки программ, которая разрабатывалась при непосредственном участии автора в ходе выполнения грантов программы «У.М.Н.И.К.» (контракты №8773p/14001 от 14.01.2011 г. и №10122p/16840 от 10.04.2012 г.), программы «У.М.Н.И.К. на С.Т.А.Р.Т.» (контракт №12483p/23934 от 28.02.2014 г.)

Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, грантов РФФИ № 13-01-00555, № 16-47-732053, № 19-47-730004, № 19-29-09048, гранта РНФ 23-21-00249, при разработке программного обеспечения для ООО «Телеком.ру», ООО «Интегра» и ООО «НПП Русмодуль». Часть программ зарегистрирована в государственном реестре программ для ЭВМ (свидетельства 2010614848, 2010614850, 2015610220, 2011611005).

Приведены примеры, иллюстрирующие возможность использования модулей программного комплекса для решения практических задач идентификации объектов на изображениях.

Проведена верификация соответствия аналитических результатов априорной оптимизации алгоритмов на основе МПГИ практическим результатам их применения. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность теоретических предположений

В заключении приведены основные результаты и выводы, имеющие научную и практическую ценность.

Основными результатами являются следующие:

1. На базе математического аппарата безидентификационной псевдоградиентной адаптации разработан новый МПГИ объектов на изображениях, обеспечивающий высокую достоверность обнаружения и точность оценивания параметров идентификации (геометрических деформаций исследуемого объекта по отношению к шаблону) в сочетании с быстродействием и работоспособностью в условиях интенсивных помех. Метод позволил существенно сократить необходимое число шаблонов. Сравнение с известными методами идентификации объектов (КЭМ и МКА), показало, что он превосходит их по быстродействию и вероятности ошибки идентификации. Показана возможность параметрической оптимизации метода.

2. На основе МПГИ предложена новая математическая модель объекта идентификации и разработаны численная процедура нахождения параметров идентификации и быстродействующие алгоритмы идентификации, основанные на адаптивном оценивании рассогласования идентифицируемого объекта и шаблона. Предложены приемы предварительной обработки исследуемых изображений, позволяющие повысить эффективность идентификации. Так, для увеличения скорости сходимости оценок и рабочей области параметров идентификации применена низкочастотная фильтрация, повышению быстродействия способствует сужение области поиска параметров идентификации за счет предварительной сегментации объекта на изображении, учёта его симметрии, а также оптимизация числа шаблонов в базе данных. Показано, что при одной и той же вероятности ложной идентификации, использование в качестве ЦФ ККЯ обеспечивает по сравнению с СКРЯ примерно на 33% большее покрытие заданной области определения параметров.

3. Предложена и исследована совокупность критериев идентификации, позволяющая повысить достоверность идентификации объектов на бинарных и

полутонных изображениях, в том числе, схожих по форме. В качестве основного критерия использована корреляция, в качестве дополнительных – не превышение заданных порогов матожиданием и СКО ЦФ качества идентификации в установившемся режиме псевдоградиентного оценивания параметров. Для каждого из критериев определены оптимальные пороговые значения. Применение дополнительных критериев на исследуемых датасетах позволило в 2 – 2,5 раза уменьшить ошибку ложной идентификации объектов.

4. С использованием математического моделирования проведено экспериментальное исследование МПГИ на тестовых бинарных и полутонных изображениях, подтвердившее его работоспособность и преимущества перед известными методами, выработаны рекомендации по использованию. Эффективность предложенного МПГИ апробирована на различных классах изображений, в частности, на металлографических, для которых разработана методика автоматизированного оценивания параметров микроструктур сталей перлитного класса (в рамках которой предложена новая математическая модель перлитных областей). Апробация методики на реальных металлографических изображениях показала, что параметры, автоматизировано найденные с использованием разработанной методики и рассчитанные по традиционным методам ГОСТ 5639 отличаются не более чем на 5 %.

5. Разработан комплекс прикладных программ для реализации и оценки эффективности предложенного метода идентификации объектов на цифровых изображениях. Приведены примеры его использования. Комплекс программ разработан на основе объектно-ориентированного подхода на языке C#. Программы реализованы в среде Microsoft Visual Studio. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение может быть непосредственно использовано в различных прикладных задачах обработки цифровых изображений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

научные статьи, опубликованные в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований, а также входящие в международные реферативные базы SCOPUS, WOS:

1. **Magdeev, R.G.** A comparative analysis of the efficiency of the stochastic gradient approach to the identification of objects in binary images / R.G. Magdeev, A.G. Tashlinskii // Pattern recognition and image analysis. – 2014. – V. 24, No. 4. – P. 535-541. – DOI:10.1134/S1054661814040130. (BAK, SCOPUS, WOS)

2. **Magdeev, R.G.** Efficiency of object identification for binary images / R.G. Magdeev, A.G. Tashlinskii // Computer Optics. – 2019. – V. 43, No. 2. – P. 277-281. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-277-281. (BAK, SCOPUS, WOS)

3. Suetin, M.N. Methodology for detecting and assessing the dynamics of defects in engineering structures by processing images from an unmanned aerial vehicle / M.N. Suetin, V.E. Dementiev, A.G. Tashlinskii, **R.G. Magdeev** // Computer Optics. – 2024. – V. 48, No. 5. – P. 762-771. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1438. (BAK, SCOPUS, WOS)

4. **Магдеев Р.Г.** Применение алгоритмов построения выпуклой оболочки при анализе изображений микроструктуры металла / Р.Г. Магдеев, Л.Ш. Биктимиров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, - 2014 - том 16, № 6(2) - С. 496-500 (ВАК)

5. Ташлинский, А.Г. Повышение достоверности идентификации объектов на бинарных изображениях / А.Г. Ташлинский, **Р.Г. Магдеев** // Информационно-измерительные и управляющие системы – 2017. – Т.15 № 12. – С. 24-30. (ВАК)

свидетельства о регистрации программ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614848 : Программа для определения степени зернистости в перлитовой составляющей металла / **Р.Г. Магдеев**, В.Е. Дементьев ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО "Ульяновский государственный технический университет". — Зарег. 27.05.2010.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614850 : Программа для определения плотности пористых структур / **Р.Г. Магдеев**, В.Е. Дементьев ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО "Ульяновский государственный технический университет". — Зарег. 27.05.2010.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611005 : Программа для определения плотности порошковых металлических структур / **Р.Г. Магдеев**, В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО "Ульяновский государственный технический университет". — Зарег. 15.02.2011.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610220 : Программа оценки средней вытянутости и направленности перлитных пятен / **Р.Г. Магдеев** ; заявитель и правообладатель ООО "ЦКАИ". — Зарег. 13.01.2015.

публикации в журналах, входящих в базу данных RSCI:

10. Виноградова, Л.А. Алгоритм определения доли зернистой фазы в перлите трубных сталей со структурой феррит и перлит / Л.А. Виноградова, Ю.А. Курганова, **Р.Г. Магдеев** // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2012. – №6. – С. 41-44.

11. **Магдеев, Р.Г.** Эффективность идентификации объектов на бинарных изображениях с использованием процедур псевдоградиентной адаптации / Р.Г. Магдеев, А.Г. Ташлинский // Радиотехника. – 2014. – № 7. – С. 96–102.

12. Ташлинский, А. Г. Оценка параметров микроструктуры стали перлитного класса по металлографическим изображениям / А.Г. Ташлинский, **Р.Г. Магдеев** // Радиотехника. – 2017. – № 6. – С. 35–40.

13. **Магдеев, Р.Г.** Выделение на металлографических изображениях малоуглеродистой стали перлита / Р.Г. Магдеев, А.Г. Ташлинский // Радиотехника. – 2018. – № 6. – С. 33-37.

материалы конференций, индексируемые в SCOPUS:

14. **Magdeev, R.G.** The effect of image pre-processing on objects adaptive stochastic identification efficiency / R.G. Magdeev, M.N. Suetin, A.G. Tashlinskii // – CEUR Workshop Proceedings, 2020. – V. 2665. – P. 85-88. – DOI: ceur-ws.org/Vol-2665/paper20.pdf

15. **Magdeev, R.G.** Efficiency of stochastic gradient identification of similar shape objects in binary and grayscale images / R.G. Magdeev, A.G. Tashlinskii, G.L. Safina // CEUR Workshop Proceedings, 2020. – V. 2665. – P. 25-28. – DOI: ceur-ws.org/Vol-2665/paper6.pdf

16. **Magdeev, R.G.** Method for identification of perlite-class steel microstructure parameters using metallographic images / R.G. Magdeev, A.G. Tashlinskiy // – CEUR Workshop Proceedings, 2017. – V. 1901. – P. 169-175. – DOI:10.18287/1613-0073-2017-1901-169-175

17. Dementiev, V.E. Detection and identification of objects on multispectral satellite images / V.E. Dementiev, **R.G. Magdeev**, A.G. Tashlinskii // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing Ltd, 2019. – V. 1368. – N. 1. – P. 032005. – DOI: 10.1088/1742-6596/1368/3/032005
18. **Magdeev, R.G.** Improving the efficiency of the method of stochastic gradient identification of objects in binary and grayscale images using their pre-processing / R.G. Magdeev, A.G. Tashlinskii // IEEE Conference Proceedings. – 2020. – P. 1-4 – DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213272
19. **Magdeev, R.** Comparative Analysis of Objective Quality Functions for the Stochastic Gradient Identification Method / R. Magdeev, G. Safina, A. Tashlinskii // IEEE Xplore (International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)). – 2021, No 21530278. – P. 1-4. DOI:10.1109/ITNT52450.2021.9649414.
20. Dementiev, V.E. Detecting anomalies in temporal image sequences based on object identification by the stochastic gradient adaptation / V.E. Dementiev, **R.G. Magdeev**, A.G. Tashlinskii // IEEE Xplore (International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)). – 2021, No 21530261. – P. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649175 .
21. Suetin, M.N. Joint Usage of Neural Networks and Stochastic Referencing of Images While Estimating Defects in Bridge Structures / M.N. Suetin, A.G. Tashlinskii, **R.G. Magdeev** // IEEE Xplore (International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)). – 2022. – No 21991984. – P. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848624.
22. **Magdeev, R.** Extraction of Convex Hulls of Metal Microstructure Objects from Metallographic Images / R. Magdeev and G. Safina // IEEE Xplore (International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)). – 2022. – P. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848695.
23. **Magdeev, R.** Analysis of the Influence of Background Areas on the Registration Efficiency of Multiple Images Bridge Structures / R. Magdeev, G. Safina, A. Tashlinskii // IEEE Xplore (International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)). – 2023. – No 10138954. DOI: 10.1109/ITNT57377.2023.10138954.