

«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

На правах рукописи



ПЕТРОВА ЕЛИЗАВЕТА КИРИЛЛОВНА

МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И
ИЗОБРАЖЕНИЙ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В
ОПТИКО-ЦИФРОВЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ
КОРРЕЛЯТОРАХ

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

**Научный
руководитель**

Стариков Ростислав Сергеевич

д.ф.-м.н., профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ (412) НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:

Одинокоев Сергей Борисович

д.т.н., доцент

профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», зам. директора НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана;

Петров Николай Владимирович

д.ф.-м.н., доцент

руководитель, ведущий научный сотрудник лаборатории цифровой и изобразительной голографии международного института «Фотоника и оптоинформатика» НИУ ИТМО;

Котова Светлана Павловна

к.ф.-м.н., с.н.с.

и.о. зав. лабораторией когерентной оптики, и.о. зам. директора по науке Самарского филиала ФИАН в г. Самара.

Защита состоится «29» сентября 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета «*МИФИ.01.04*» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



к.ф.-м.н.,
Степаненко А. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

С появлением доступных средств цифровой регистрации изображений возникла необходимость быстрой обработки большого объёма информации. Задача распознавания образов стала чрезвычайно важным и практическим инструментом в различных отраслях как научных исследований, так и технических приложений. Одним из методов, позволяющих быстро и эффективно решить задачу распознавания изображений, является корреляционный метод. Достоинством данного метода является возможность реализации распознавания изображений в схемах оптико-цифровых корреляторов, которые за счёт развития современных средств модуляции обладают высокой скоростью и энергоэффективностью при возможности точной локализации объекта во входной сцене. В настоящее время оптические корреляционные системы являются одними из немногих доступных вычислительных средств, обеспечивающих пропускную способность на уровне десятков гигабит в секунду. Основными проблемами корреляционного метода является сильное влияние на результаты распознавания шумов и искажений «объекта интереса», а также низкого разрешения исходных изображений. Проблема искажений преодолевается за счёт использования методов синтеза инвариантных фильтров (ИФ), позволяющих заложить инвариантность к заранее определенным искажениям объекта. Проблема низкого разрешения может быть решена за счёт применения предварительной обработки входных изображений, а именно: использование цветовой информации и применение методов линейной интерполяции для увеличения разрешения. Особый практический интерес представляет применение корреляционного метода для распознавания цветных изображений. Данная работа посвящена исследованию особенностей синтеза и реализации ИФ для цветных изображений и

изображений низкого разрешения.

Целью работы является исследование методов синтеза инвариантных фильтров для задач корреляционного распознавания цветных изображений и изображений низкого разрешения, а также исследование и разработка методов реализации фильтров в схемах когерентных оптико-цифровых дифракционных корреляторов изображений на базе новейших устройств пространственной модуляции света. Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

- Исследование и разработка алгоритмов синтеза и применения ИФ для задачи корреляционного распознавания цветных изображений;
- Исследование и разработка алгоритмов синтеза и применения ИФ для задачи корреляционного распознавания изображений низкого разрешения;
- Численное моделирование различных постановок задачи корреляционного распознавания цветных изображений и изображений низкого разрешения с использованием перспективных типов ИФ;
- Экспериментальная реализация ИФ для схем когерентных оптико-цифровых корреляторов с использованием новейших средств пространственной модуляции света;
- Проведение оценок качества корреляционного распознавания при использовании ИФ в различных модельных и практических условиях постановки задачи.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется тем, что в ней:

1. Впервые предложены методы инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений, основанные на при-

менении априорной информации о цвете «объекта интереса» для выбора цветовой модели и/или цветового канала либо линейной комбинации каналов. Данные методы дают возможность существенно повысить точность классификации объектов и обеспечивают возможность обработки изображения за один такт работы когерентного дифракционного коррелятора изображений.

2. Впервые предложен метод инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений низкого разрешения - от 32×32 пикс., использующий интерполяцию входных изображений и изображений высокого разрешения для синтеза инвариантного фильтра.
3. Численным моделированием и экспериментально показано, что применение предложенных методов распознавания цветных изображений и изображений низкого разрешения обеспечивает возможности решения таких задач, как локализация объектов интереса и их классификация. Обработка бинарных силуэтов цветных изображений, полученных с помощью предложенных методов, выполненная в корреляторе совместного преобразования с использованием бинарной фазовой модуляции, позволяет реализовать процесс распознавания с частотой обновления кадров более 1 кГц.
4. Продемонстрированы возможности инвариантного корреляционного распознавания изображений лабораторных моделей объектов с точностью более 80% для случая применения различных фоторегистраторов при получении тренировочных и распознаваемых изображений.
5. Впервые продемонстрированы возможности решения задач идентификации и классификации объектов с использованием син-

теза инвариантных фильтров на основе изображений лабораторной модели «объекта интереса» и корреляционной обработки изображений, полученных путём фоторегистрации натуральных объектов, а также использования изображений объектов из различных доступных источников изображений.

Практическая значимость

Практическая значимость работы обусловлена тем, что она служит в качестве теоретической и экспериментальной базы для создания систем высокоскоростного корреляционного распознавания объектов, представленных цветными изображениями и изображениями низкого разрешения, базирующихся на когерентных оптико-цифровых корреляторах. Такие системы могут быть применены в различных областях науки и техники, таких как автоматическое зрение и дистанционное зондирование, производственный мониторинг, секвенирование ДНК, а также при аппаратной реализации алгоритмов глубокого обучения и моделирования нейронных сетей.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Предложены методы инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений низкого разрешения, основанные на применении априорной информации о цвете «объекта интереса» для выбора цветовой модели, канала цветовой модели либо линейной комбинации каналов. Методы дают возможность повысить точность классификации объектов с типичных для стандартных полутоновых изображений 73-89% до 94%. Методы обеспечивают возможность обработки изображения за один такт работы когерентного дифракционного коррелятора изображений.
2. Предложен метод для инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений низкого разрешения - от 32×32 пикс., использующий интерполяцию входных изображений.

жений и изображений высокого разрешения для синтеза инвариантного фильтра. Метод обеспечивает увеличение точности классификации до 97%.

3. Численным моделированием показаны возможности инвариантного корреляционного распознавания изображений лабораторных моделей объектов с точностью более 80% для случая применения различных фоторегистраторов при получении тренировочных и распознаваемых изображений.
4. Экспериментальная апробация предложенных методов корреляционного распознавания реализована в виде бинарных силуэтов «объектов интереса». Обработка таких изображений, выполненная в корреляторе совместного преобразования с использованием бинарной фазовой модуляции, позволяет реализовать процесс распознавания с частотой обновления кадров более 1 кГц.
5. Предложено решение задач локализации и классификации объектов для случая синтеза инвариантных фильтров на основе изображений лабораторной модели «объекта интереса» и обработки изображений «объектов интереса», полученных из различных доступных источников изображений, с использованием предложенных методов корреляционного распознавания.

Апробация работы

Результаты диссертации представлены в докладах на конференциях:

- Международная школа-симпозиум по когерентной оптике и голографии (2015, 2017, 2019 гг.);
- Всероссийский молодёжный самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (2018 г.);

- Современные проблемы физики и технологий. V Международная молодёжная научная школа-конференция (2016 г.);
- Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники (2016, 2017 гг.);
- Международная конференция по фотонике и информационной оптике (2015, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021 гг.);
- 12-й международная конференция «Голография. Наука и практика» «Голоэкспо2015» (2015 г.);
- XIX Международная телекоммуникационная конференция молодых учёных и студентов «Молодёжь и наука» (2015 г.);
- Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике (2012, 2013, 2014 гг.).

Публикации по теме

По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы:

- 7 статей в изданиях, включённых в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в базах данных WoS и Scopus,
- 17 – в трудах международных и всероссийских конференций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы, включающего 67 наименований. Общий объем диссертации 145 страниц, включая 91 рисунок и 24 таблицы.

Содержание работы

Первая глава посвящена анализу предметной области [1, 2]. Был проведён обзор оптических схем $4f$ -коррелятора и коррелятора совместного преобразования (КСП). Применение ИФ позволяет заложить инвариантность к таким искажениям, как пространственный поворот, изменения освещённости или масштаба. В работе были использованы два типа ИФ: фильтр с минимумом энергии корреля-

ции (ИФ МЭК) и оптимально-компромиссный фильтр с максимальной средней высотой корреляционного пика (ОК МСВКП). Показаны три типа корреляционных метрик: высота пика, отношение «пик/энергия корреляции», отношение «пик/склон» [3].

Во второй главе приведён краткий обзор возможностей решения задачи инвариантного к геометрическим искажениям распознавания изображений с помощью методов машинного обучения и свёрточных нейронных сетей. Для таких методов вероятность правильного распознавания составляет порядка 80-90%. Были рассмотрены теоретические аспекты формирования цвета и представлены основные цветовые модели, используемые в цифровой обработке изображений. Представлено описание основных алгоритмов корреляционной обработки многоканальных цифровых изображений [4, 5]. В качестве недостатков была отмечена необходимость синтеза нескольких ИФ, сложность оптической схемы или снижение скорости распознавания за счёт последовательного выполнения обработки для каждого канала. Представлены основные методы повышения размерности изображений на основе линейной интерполяции [6] с разрешением от 32×32 пикс. В §2.3 предложены методы, основанные на использовании априорной информации о цвете «объекта интереса», позволяющие осуществить корреляционное распознавание в один такт с высокой точностью за счёт выбора соответствующей цветовой модели представления входных и тренировочных изображений. Предложена схема повышения точности стандартного метода многоканального корреляционного распознавания за счёт нелинейной постобработки выходных корреляционных сигналов. Разработан метод повышения точности корреляционного распознавания цветных изображений низкого разрешения, основанный на 1) использовании априорной цветовой информации для выбора модели цифрового представления, 2) синтезе ИФ из

тренировочных изображений высокого разрешения и 3) интерполяции входных изображений для повышения их размерности. Схема метода представлена на рисунке 1.

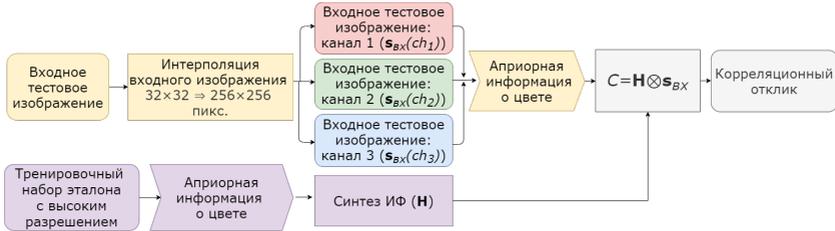


Рисунок 1 – Схема действий для корреляционного распознавания изображений низкого разрешения с использованием алгоритмов интерполяции и априорной информации о цвете

Глава три посвящена математическому моделированию систем инвариантного корреляционного распознавания для цветных изображений и/или изображений низкого разрешения «объектов интереса». В §3.1 описана постановка задачи. Приведены условные обозначения и примеры изображений эталонных «объектов интереса» (рисунок 2).



Рисунок 2 – «Объекты интереса» типа «S», «C» и «T»

В §3.2 приведены результаты моделирования для цветных изображений в различных цветовых моделях. Выделены результаты с использованием независимости каналов (3.2.1) и с разницей каналов (3.2.2). На

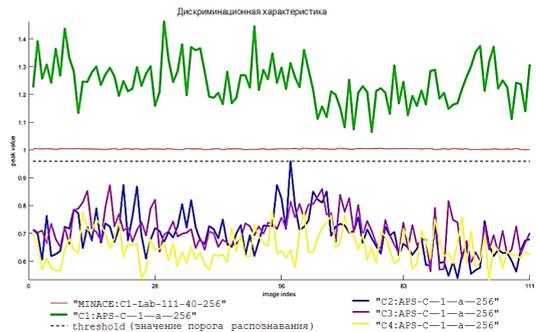


Рисунок 3 – SNR для модели Lab в канале а (оттенок)

рисунке 3 показан пример дискриминационной характеристики – зависимости корреляционного отклика от номера изображения. Номер изображения соответствует углу поворота. Здесь и далее для всех дискриминационных характеристик в названии рисунка будет приводиться используемая корреляционная метрика. На основе полученных результатов для дальнейшей работы с изображениями низкого разрешения выбрана модель Lab, показавшая наиболее стабильные результаты для объектов типа «С1-С4». Вероятность ошибки при использовании модели Lab варьируется от десятой и ниже доли процента для метрики высоты корреляционного пика. Для других метрик вероятность ошибки также не превышает 10%.

В §3.3 показаны варианты работы ИФ для распознавания изображений низкого разрешения: без учёта обработки, с использованием информации о цвете, с предварительной обработкой, которая может включать линейные методы интерполяции и/или информацию о цвете.

Для изображений с малым разрешением без учёта обработки наилучший результат для изображения 32×32 пикс. получен на белом фоне с вероятностью правильного распознавания 73%, что сопоставимо с результатами других методов решения задачи распознавания.

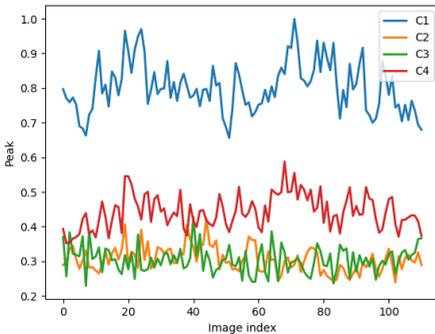


Рисунок 4 – PCE для бикубической интерполяции

Использование одновременно методов линейной интерполяции и цветовой информации позволило повысить вероятность правильного распознавания в модельной задаче до 97%. На рисунке 4 приведён пример дискриминационной характеристики ИФ для изображений 32×32

пикс. в случае применения бикубической интерполяции. ИФ синтезирован на основе модели Lab в трёх цветовых каналах, тестовый набор представлен в канале L (светлота).

Было проведено моделирование работы оптических корреляторов с учётом сдвига фазы. Приведены результаты моделирования для ИФ МЭК и ОК МСВКП.

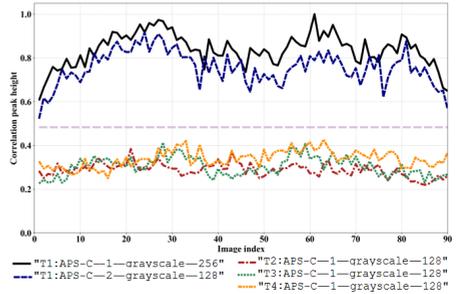


Рисунок 5 – SNR для сдвига фаз LC SLM: «Оптимизированный» случай

На рисунке 5 приведена дискриминационная характеристика для ОК МСВКП для линейной зависимости сдвига фаз LC SLM: «Оптимизированный» случай. Фильтр синтезирован из изображений объекта «Т1» размерностью 256×256 пикс. в режиме grayscale на чёрном фоне, тестовые наборы имеют разрешение 128×128 пикс. При синтезе ИФ была учтена зависимость фазового сдвига от уровня амплитуды. Вероятность правильного распознавания без учёта фазы составила 88%, а для «Оптимизированного» случая свыше 99,99%.

На настоящий момент современными средствами модуляции в оптических корреляторах можно получить скорость вычисления до 10^{13} операций в секунду [7, 8].

В четвёртой главе приведены экспериментальные результаты оптической реализации для ИФ. Дан обзор технических характеристик современных средств модуляции с описанием жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС) двух типов: амплитудного и фазового, а также амплитудного цифрового микрзеркального модулятора света (МЗ ПВМС) с управляющим контроллером DLP Discovery 4100.

Были проведены эксперименты по регистрации световых распределений, сформированных голографическими фильтрами с использованием различных ПВМС. На рисунке 6 показаны сфотографированные с помощью фазовых ЖК ПВМС и амплитудного МЗ ПВМС «DLP Discovery 4100» изображения ИФ для объекта «Т1».

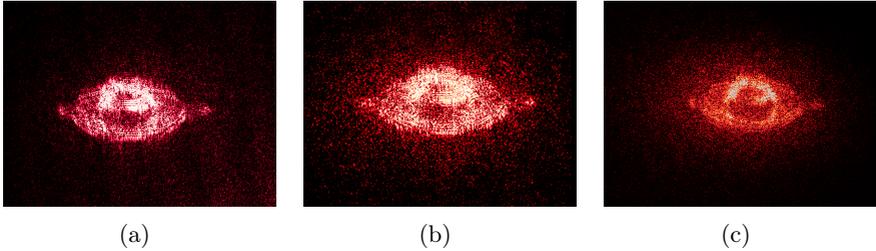


Рисунок 6 – Изображение ИФ, восстановленные с ГФ для:
(a) – ЖК ПВМС «Santec SLM 200»; (b) – ЖК ПВМС «HoloEye Pluto VIS»; (c) – МЗ ПВМС «DLP Discovery 4100»

Общая оптическая схема экспериментальной установки (КСП) включает в себя: источник когерентного излучения, коллиматор, состоящий из системы линз и микродиафрагмы, пространственно-временной модулятор света (ПВМС), линзу, светофильтр и камеру. На первом такте формируется совместный спектр объектов. Корреляционный пик получается на втором такте работы КСП, когда на модулятор поступает совместный спектр от объекта и фильтра.

Реализованы эксперименты для коррелятора совместного преобразования с ЖК ПВМС отражающего типа. На первом этапе были созданы сцены с объектами «С1-С4», представленными в различных цветовых каналах. Все результаты эксперимента демонстрируют высокую степень соответствия с рассчитанными откликами. На втором этапе было проведено моделирование и экспериментальная реализация для случая силуэтов истинного объекта и ложных объектов, не имеющих с истинным сходных элементов. Показаны сцена (рис. 7(a)) и совместный спектр, численно рассчитанный (рис. 7(b)) и экспериментальный (рис. 7(c)), а также рассчитанные (рис. 8(a))

и 8(b)) экспериментальные (рис. 8(c)) корреляционные пики для случая истинного объекта.

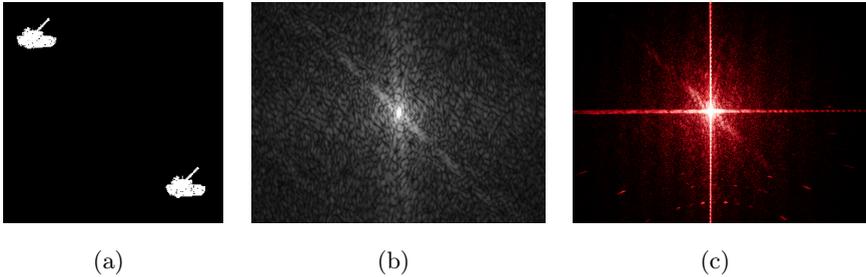


Рисунок 7 – (a) – сцена с истинным объектом; (b) – расчётный спектр; (c) – экспериментальный спектр

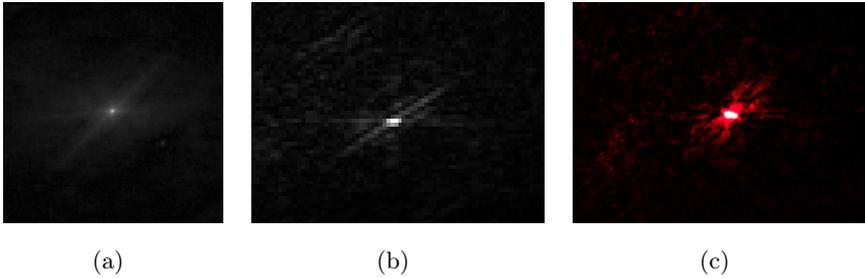


Рисунок 8 – Корреляционные пики: (a) – расчётный; (b) – расчётный, полученный с экспериментального спектра; (c) – экспериментальный

В пятой главе приведены результаты корреляционного распознавания с использованием различных средств регистрации изображения. Была показана возможность применения различных фоторегистраторов. Были использованы камеры с разным разрешением. В случае, когда тренировочный набор изображений сформирован с помощью регистратора высокого разрешения, а тестовые наборы получены web-камерой низкого разрешения, вероятность правильного распознавания составила 80% и выше. В качестве тестовых наборов изображений были использованы произвольные изображения объектов, взятых из открытых источников. ИФ синтезирован на основе имеющихся изображений масштабной модели истинного

объекта. «Объекты интереса» типа CV не имеют общих элементов с объектами фильтра, объекты ME и Ti:Nat содержат сходные с объектом фильтра детали. Примеры CV, ME и Ti:Nat приведены на рисунке 9:



Рисунок 9 – Объекты из произвольных источников изображений

На рисунке 10 показаны корреляционные сигналы для приведённых объектов. В случае, когда тестовый набор включает изображения истинного объекта и ложных объектов, не имеющих сходных элементов с истинным, характеристики полученных корреляционных пиков при использовании цветовой информации обеспечивают возможности классификации.

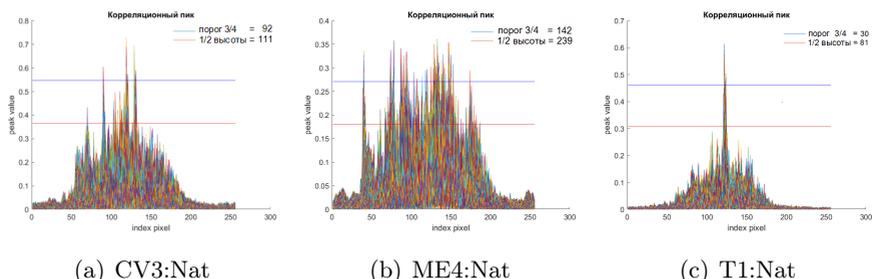


Рисунок 10 – Корреляционные сигналы

Основные выводы работы

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Проведён анализ алгоритмов представления цветовой информации в методах цифровой обработки изображений, а также алгоритмов корреляционного распознавания цветных изображений.

жений. Рассмотрены основные алгоритмы линейной интерполяции изображений низкого разрешения.

- Предложены методы использования априорной информации о цвете объекта интереса, обеспечивающие реализацию корреляционного распознавания за один такт с высокой точностью.
 - Предложен метод повышения точности корреляционного распознавания изображений низкого разрешения, основанный на использовании тренировочных изображений высокого разрешения для синтеза фильтра, априорной информации о цвете и на применении методов интерполяции для повышения разрешения входных изображений.
2. Проведено численное исследование корреляционных свойств возможностей применения инвариантных фильтров МЭК и ОК МСВКП для задачи распознавания цветных изображений и изображений низкого разрешения для таких случаев, как плоские векторные изображения, объекты одинаковой формы, но разного цвета, объекты со схожей конфигурацией и близким цветом. Показано, что для стандартных полутоновых изображений низкого разрешения (до 32×32 пикселя) вероятность правильного распознавания для контрастного однотонного фона составляет 89% для чёрного и 73% для белого, что сопоставимо с другими методами распознавания (сверточными нейронными сетями – 72-88%). Применение методов на основе использования информации о цвете объекта интереса и алгоритмов интерполяции входных изображений позволили повысить вероятность правильного распознавания до 97%.
 3. Показано, что при распознавании входных изображений в когерентном дифракционном корреляторе учёт аддитивного фазового сдвига ЖК ПВМС при синтезе ИФ позволяет увели-

чить точность распознавания с 88% до 99%, что даёт возможность распознавания изображений с разрешением от 32×32 пикс. без использования дополнительной предобработки.

4. Экспериментально исследованы возможности реализации импульсного отклика 4-f коррелятора с использованием современных образцов ПВМС и методов компьютерного синтеза голографических Фурье-фильтров. Результаты регистрации с помощью матричного фотодетектора амплитуды изображений, восстановленных в схеме когерентного Фурье-каскада с помощью компьютерно-синтезированных голограмм Фурье и реализованных путём вывода на экран ПВМС, демонстрируют высокую степень соответствия исходным цифровым моделям фильтров.
5. Экспериментально исследованы возможности реализации алгоритмов корреляционного распознавания в схеме когерентного коррелятора совместного преобразования на основе ЖК ПВМС «Santec SLM 200» и He-Ne лазера и показано, что:
 - Для случая, когда объекты имеют одинаковую форму, с учётом различных каналов могут быть получены точечные корреляционные пики, что позволяет классифицировать «объект интереса»;
 - Для случая представления натуральных объектов в виде силуэтов получены корреляционные сигналы (точечный – для истинного объекта и широкие – для ложных), что позволяет произвести идентификацию. Использование бинарных силуэтов «объектов интереса» даёт возможность реализовать распознавание с помощью бинарного ПВМС и за счёт этого увеличить скорость корреляционного распознавания.

Во всех перечисленных экспериментах наблюдается высокая

степень соответствия рассчитанных и измеренных сигналов, что подтверждает полученные результаты численного моделирования.

6. Исследовано влияние использования различных фоторегистраторов для получения входных и тренировочных изображений на точность инвариантного корреляционного распознавания.
 - Получено, что в случае использования одной и той же высококачественной камеры для получения тренировочного и тестовых наборов, вероятность правильного распознавания может составить выше 99%.
 - В случае, когда тренировочный набор получен одной камерой, а в качестве тестовых наборов использовались изображения истинных и ложных объектов, полученные с помощью камеры с более низкими характеристиками, вероятность правильного распознавания может составить 80% и выше.
7. С использованием ИФ, синтезированных на основе имеющихся изображений модели истинного объекта, проведено моделирование распознавания для случая, когда тестовый набор включал различные изображения реальных истинного и ложных объектов, взятых из открытых баз изображений.
 - В случае, когда в качестве тестовых изображений взяты фотографии истинного объекта, получены узкие и высокие корреляционные пики, которые позволяют классифицировать объект как истинный.
 - В случае, когда тестовый набор включает изображения истинного объекта и ложных объектов, имеющих сходные элементы с истинным, характеристики полученных корреляционных сигналов обеспечивают только возмож-

ность обнаружения без возможности классификации.

- В случае, когда тестовый набор включает изображения истинного объекта и ложных объектов, не имеющих сходных элементов с истинным, характеристики полученных корреляционных сигналов при использовании цветовой информации обеспечивают возможности классификации.

Список цитируемой литературы

- [1] Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics. San Francisco, USA: McGraw-Hill, 1968.
- [2] Lugt A. V. Signal detection by complex spatial filtering // IEEE Transactions on Information Theory. 1964. Vol. 10, no. 2. P. 139–145.
- [3] Kumar B. V. K. V., Mahalanobis A., Juday R. D. Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press, 2005.
- [4] Color component transformations for optical pattern recognition / V. Kober, V. Lashin, I. Moreno et al. // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. Oct. Vol. 14, no. 10. P. 2656–2669. URL: <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-14-10-2656>.
- [5] Accurate colour control by means of liquid crystal modulators / I. Moreno, J. L. Martínez, P. García-Martínez et al. // Optics and Photonics for Information Processing V. 2011. Vol. 8134. P. 104 – 110. URL: <https://doi.org/10.1117/12.893925>.
- [6] Крылов А. С., Насонов А. В. Компьютерное повышение разрешения изображений с использованием методов математической физики. Москва: МАКС Пресс, 2011. с. 72.
- [7] Ikeda K., Suzuki H., Watanabe E. Optical correlation-based cross-domain image retrieval system // Opt. Lett. 2017. Jul. Vol. 42, no. 13. P. 2603–2606. URL: <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-42-13-2603>.
- [8] High-speed optical processing using digital micromirror device / T.-H. Chao, T. Lu, B. Walker et al. // Optical Pattern Recognition XXV / Ed. by D. Casasent, T.-H. Chao; International Society for

Optics and Photonics. Vol. 9094. SPIE, 2014. P. 1 – 4. URL:
<https://doi.org/10.1117/12.2054349>.

Статьи в журналах, включённые в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в базах данных WOS и SCOPUS

1. Особенности применения инвариантных корреляционных фильтров для распознавания цветных субпиксельных изображений / **Е.К. Петрова**, Р.С. Стариков, Д.С. Гончаров [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 8. С. 672—679.
Features of invariant correlation filters application for recognition of color subpixel images / D.S. Goncharov, **Е.К. Petrova**, N.M. Ponomarev et al. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2020.
2. Implementation Features of Invariant Optical Correlator Based on Amplitude LC SLM / D.S. Goncharov, **Е.К. Petrova**, N.M. Ponomarev et al. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2020. Vol. 29, no. 2. P. 110–117.
<https://doi.org/10.3103/S1060992X20020022>
3. Features of the Implementation of Holographic Invariant Correlation Filters Based on a Phase Liquid-Crystal Space-Time Light Modulator / D.S. Goncharov, E.Yu. Zlokazov, **Е. К. Petrova** et al. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2019. Vol. 46, no. 4. P. 126–129.
<https://doi.org/10.3103/S1068335619040055>
4. Investigation of MINACE composite filter capabilities for multicolor images correlation recognition purposes / N. N. Evtikhiev, E.Yu. Zlokazov, **Е.К. Petrova** et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 737. 2016. p. 012057.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012057>
5. Инвариантные фильтры с минимизацией шума и энергии корреляции: исследование дискриминационных характеристик в различных постановках задачи распознавания / Евтихийев Н.Н., Злоказов Е.Ю., **Петрова Е.К.** [и др.] // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 11/3. С. 123–127.

6. Variants of light modulation for MINACE filter implementation in 4-F correlators / D.V. Shaulskiy, N N. Evtikhiev, **Е.К. Petrova** et al. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2015. Vol. 9598. 2015. p. 95980T.
<https://doi.org/10.1117/12.2190700>
7. MINACE Filters: Recognition of the Images Received from Various Independent Sources / N.N. Evtikhiev, **Е.К. Petrova**, R.S. Starikov et al. // Physics Procedia. 2015. Vol. 73. 2015. P. 246–250.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.165>

Публикации в трудах конференций

1. Е.К. Петрова, Р.С. Стариков, Е.Ю. Злоказов «Эксперименты по корреляционному распознаванию изображений, полученных из произвольных источников» // Сборник научных трудов. X Международная конференция по фотонике и информационной оптике. НИЯУ МИФИ, Москва, 2021 С. 183–184.
2. Д.С. Гончаров, Е.К. Петрова, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков. «Возможности использования цветовой информации для обнаружения и распознавания субпиксельных объектов в условиях зашумленности изображения». // Сборник научных трудов. IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. НИЯУ МИФИ, Москва, 2019. С. 693-694.
3. Д.С. Гончаров, Е.К. Петрова, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков. «Особенности применения цветowych моделей при распознавании цветных изображений с использованием инвариантных корреляционных фильтров» // Сборник научных трудов. VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. НИЯУ МИФИ, Москва, 2019. С. 723-724.
4. Гончаров Д.С., Злоказов Е.Ю., Петрова Е.К., Пономарев Н.М., Стариков Р.С. «Особенности реализации голографических инвариантных корреляционных фильтров на базе фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света» // Сборник трудов конференции. XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике. Самара, 2018. С. 283-291.
5. Злоказов Е.Ю., Петрова Е.К., Пьянков С.С., Стариков Р.С., Шаульский

- Д.В. Исследование методов синтеза инвариантных корреляционных фильтров на основе эталонных изображений, формируемых с помощью трёхмерных моделей «объектов интереса» // ЛП Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, 15–17 мая 2017. Тезисы докладов – М.: РУДН, 2017. – С. 183-186.
6. Гончаров Д.С., Петрова Е.К., Пономарев Н.М., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Синтез и исследование инвариантного корреляционного фильтра с максимальной средней высотой корреляционного пика» // Сборник научных трудов. VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. НИЯУ МИФИ, Москва, 2017. С. 618-619.
 7. Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Моделирование инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений объектов в условиях поворота» // Сборник научных трудов. V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. НИЯУ МИФИ, Москва, 2016. С. 195-196.
 8. Евтихийев Н.Н., Петрова Е.К., Пьянков С.С., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Исследование возможностей синтеза инвариантных корреляционных фильтров на базе искусственных настроечных наборов, полученных путём манипуляции характеристиками реальных изображений» // Сборник научных трудов. V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. НИЯУ МИФИ, Москва, 2016. С. 430-431.
 9. Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Исследование особенностей синтеза инвариантных корреляционных фильтров при распознавании цветных изображений» // ЛП Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, 17-19 мая 2016 г. Тезисы докладов – М.: РУДН, 2016. С. 196-199.
 10. Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Моделирование инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений объектов в условиях поворота» // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. Тезисы докладов V Международной молодежной научной школы-конференции. 2016. С. 310-311.
 11. Шаульский Д.В., Стариков Р.С., Злоказов Е.Ю., Евтихийев Н.Н., Петрова Е.К., Молодцов Д.Ю. «Инвариантные фильтры с минимумом шума и энергии корреляции: возможности реализации с применением современных пространственно-временных модуляторов света» // В сборнике:

- Голография. Наука и практика. Сборник трудов. 2015. С. 190-195.
12. Евтихийев Н.Н., Злоказов Е.Ю., Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Инвариантные фильтры с минимизацией шума и энергии корреляции: исследование характеристик распознавания изображений, полученных из различных независимых источников» // Сборник научных трудов. IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике. НИЯУ МИФИ, Москва, 2015. С. 360-361.
 13. Петрова Е.К. «Моделирование инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений объектов в условиях поворота» // В книге: XIX Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука». Тезисы докладов. 2015. С. 267-268.
 14. Петрова Е.К., Пьянков С.С. «Исследование возможностей синтеза инвариантных корреляционных фильтров на базе искусственных настроечных наборов, полученных путём манипуляции характеристиками реальных изображений» // В книге: XIX Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука». Тезисы докладов. 2015. С. 269-270.
 15. Злоказов Е.Ю., Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Исследование корреляционных метрик для распознавания изображений с использованием инвариантных фильтров с минимумом шума и энергии корреляции» // Сборник научных трудов. III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике научная сессия «НИЯУ МИФИ–2014», Москва, 2014. С. 151.
 16. Злоказов Е.Ю., Курбатов И.А., Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Варианты корреляционных фильтров с минимизацией энергии корреляции: голографическая реализация» // Сборник научных трудов. II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2013. С. 268.
 17. Злоказов Е.Ю., Курбатов И.А., Петрова Е.К., Стариков Р.С., Шаульский Д.В. «Исследование информативной ёмкости и шумовых характеристик инвариантных корреляционных фильтров с оптимизацией параметров корреляционного пика» // Сборник научных трудов. Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Москва, МИФИ, 2012. С. 196-197.

Петрова Елизавета Кирилловна

Методы распознавания цветных изображений и изображений низкого разрешения в оптико-цифровых когерентных дифракционных корреляторах.

Автореферат дис. на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Подписано к печати _____ Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____