«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Гончаров Дмитрий Сергеевич

Когерентные оптико-цифровые корреляторы изображений с нейросетевой обработкой выходных сигналов

Специальность 01.04.21 — лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва — 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научный руководитель	**Стариков Ростислав Сергеевич** д.ф.-м.н., профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ (412) НИЯУ МИФИ
Официальные оппоненты	**Ромашко Роман Владимирович** д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, директор ИАПУ ДВО РАН **Компанец Игорь Николаевич** д.ф.-м.н., профессор, высококвалифицированный главный научный сотрудник ФИАН **Колючкин Василий Васильевич** к.т.н., доцент кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана

Защита состоится «29» сентября 2021 г. в 17 часов 30 минут 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 и на сайте **https://ds.mephi.ru** федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «____»_____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного
совета МИФИ.01.04 /Степаненко А.А./

Общая характеристика работы

Различные технологии распознавания изображений начали активно развиваться в середине 20-ого века. На сегодняшний день существует два основных подхода к распознаванию изображений: использование оптических систем и компьютерных алгоритмов. Большой интерес для реализации оптических систем распознавания изображений представляет метод инвариантной корреляции. Среди компьютерных алгоритмов наибольшую эффективность показывают искусственные нейронные сети.

Метод инвариантной корреляции изображений, основанный на пространственной фильтрации сигналов, в силу своей простоты может быть полностью реализован в оптической системе. Использование инвариантных фильтров (ИФ) при распознавании изображений, например, OT MACH или MINACE, обеспечивает инвариантность к пространственному повороту объектов интереса, уровню освещённости, шумам и другим искажениям. Применение современных средств высокоскоростной модуляции оптических сигналов и высокоскоростных фотокамер даёт возможность распознавать изображения со скоростью до 30 тысяч кадров в секунду при размере кадра до 1920×1080 пикселей. Метод инвариантной корреляции успешно используется для ряда задач.

По мере развития искусственных нейронных сетей произошёл переход от персептронов с несколькими нейронами до свёрточных нейронных сетей (СНС), содержащих десятки миллионов обучаемых параметров. На сегодняшний день с помощью СНС решаются различные задачи компьютерного зрения. Такие архитектуры СНС, как ResNet, Inception, EfficientNet, используются для классификации изображений; СНС SSD, RetinaNet и YOLO применяются для детекции объектов интереса на изображениях; сегментация изображений осуществляется с помощью СНС UNet и Mask R-CNN. СНС обеспечивают высокое качество распознавания изображений, превосходящее человеческие возможности, а гибкость СНС позволяет эффективно использовать их для совершенно различных задач обработки изображений, например, для анализа медицинских снимков.

Современной тенденцией развития методов распознавания изображений является комбинация оптических систем и СНС. В 2016 году представлен способ оптического вычисления первого слоя СНС для снижения вычислительных и энергетических затрат при обработке изображений. В 2019 году представлена концепция оптической предобработки СНС, которая заключается в модификации исходной архитектуры СНС для анализа признаков, извлечённых из изображений оптическим путём.

В соответствии с вышесказанным, **целью диссертации** является разработка и экспериментальная апробация методов создания систем распознавания образов, сочетающих высокий параллелизм когерентных оптических систем обработки информации с точностью и гибкостью свёрточных нейронных сетей.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Проведение исследования особенностей реализации метода инвариантной корреляции изображений в когерентных оптико-цифровых системах. Разработка концепции схемы когерентного оптико-цифрового коррелятора с нейросетевой обработкой корреляционных сигналов.
2. Исследование особенностей модуляции лазерного излучения, осуществляемой современными пространственно-временными модуляторами света. Экспериментальное исследование особенностей модуляции света, осуществляемой амплитудным жидкокристаллическим пространственно-временным модулятором света. Проведение экспериментов по реализации голографических фильтров.
3. Изучение особенностей функционирования свёрточных нейронных сетей. Выбор и реализация подходящей архитектуры свёрточной нейронной сети для обработки (классификации) корреляционных сигналов. Выполнение компьютерных экспериментов по нейросетевой обработке корреляционных сигналов и анализ результатов.
4. Численное моделирование функционирования когерентных оптико-цифровых корреляторов с обработкой выходных сигналов выбранной свёрточной нейронной сетью. Моделирование функционирования различ-

ных конфигураций когерентного оптико-цифрового коррелятора с учётом исследованных особенностей модуляции лазерного излучения. Выбор предпочтительной конфигурации когерентного оптико-цифрового коррелятора.

5. Экспериментальная апробация разработанных методов обработки корреляционных сигналов, полученных с помощью реальных когерентных оптико-цифровых корреляторов изображений.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Впервые предложено использование свёрточной нейронной сети для классификации корреляционных сигналов на основе анализа формы центральной части корреляционного сигнала с применением инвариантных фильтров. Отмечено, что свёрточная нейронная сеть, обученная для классификации корреляционных сигналов, полученных для одного типа объектов, может быть успешно применена для классификации корреляционных сигналов, полученных для объектов других типов.

2. Впервые предложен и успешно продемонстрирован метод оптимизации синтеза инвариантных фильтров, позволяющий повысить качество корреляционного распознавания в когерентных оптических системах с учётом особенностей различных средств пространственной модуляции света.

3. Исследовано функционирование различных конфигураций когерентных оптико-цифровых корреляторов с фильтрацией в плоскости пространственных частот с учётом особенностей модуляции света, осуществляемой жидкокристаллическими пространственно-временными модуляторами света. Численным моделированием показано, что коррелятор, использующий амплитудный модулятор для ввода распознаваемых изображений и фазовый модулятор для ввода голографических фильтров, обеспечивает наилучшие характеристики распознавания.

4. Реализована система распознавания изображений, основанная на когерентном оптико-цифровом корреляторе совместного преобразования и свёрточной нейронной сети, используемой для классификации оптических корреляционных сигналов.

5. Выполнена успешная классификация выходных оптических сигналов когерентных корреляторов изображений с использованием свёрточной нейронной сети, обученной на численно-синтезированных корреляционных сигналах.

Практическое значение диссертации заключается в том, что она служит теоретической и экспериментальной базой для создания современной высокоскоростной системы распознавания изображений. Предложенные методы оптимизации инвариантных фильтров и нейросетевой обработки корреляционных сигналов позволят значительно увеличить точность работы системы по сравнению с аналогичными системами распознавания изображений.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Численным моделированием показано, что предложенная архитектура системы распознавания изображений, основанная на когерентном оптико-цифровом корреляторе и свёрточной нейронной сети, обеспечивает улучшение качества распознавания изображений не менее, чем на 10%.
2. Точность классификации по F-мере корреляционных сигналов, с использованием известных и модифицированных архитектур свёрточных нейронных сетей и предложенных методов аугментации изображений, составляет от 85% до 93%.
3. Предложенный метод оптимизации инвариантных фильтров, учитывающий особенности модуляции амплитудных и фазовых жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света, используемых для ввода распознаваемых изображений, обеспечивает повышение точности инвариантного корреляционного распознавания изображений не менее, чем на 10%.
4. Численным моделированием показано, что при использовании инвариантных фильтров свёрточная нейронная сеть, обученная для классификации корреляционных сигналов, полученных для одного типа объектов, может быть успешно применена для классификации корреляционных сигналов, полученных для объектов других типов.

5. Экспериментальная демонстрация успешной классификации оптических сигналов когерентных корреляторов изображений свёрточной нейронной сетью, обученной на корреляционных сигналах, синтезированных численно.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. VI международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, НИЯУ МИФИ, 2017);
2. X международная конференция молодых учёных и специалистов «Оптика-2017» (Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2017);
3. VII международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, НИЯУ МИФИ, 2018);
4. международная конференция «Practical Holography XXXII: Displays, Materials, and Applications» (США, Сан-Франциско, 2018);
5. XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям «Holoexpo 2018» (Нижний Новгород, 2018);
6. X международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики — 2018» (Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2018);
7. XVI всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 2018), где занял третье место;
8. VIII международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, НИЯУ МИФИ, 2019);
9. XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям «Holoexpo 2019» (Санкт-Петербург, 2019);
10. IX международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, НИЯУ МИФИ, 2020).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 24 печатных работы, среди них: 6 работ в рецензируемых изданиях, включённых в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в базах данных Scopus и WoS, 17 работ в трудах международных конференций,

индексируемых в базе данных РИНЦ и 1 работа в трудах всероссийских конференций, индексируемых в базе данных РИНЦ.

Структура диссертации: диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников. Содержит 142 страницы машинописного текста, 63 рисунка и 13 таблиц. Библиография включает 89 наименований на 10 страниц.

Содержание работы

В **первой главе** представлен обзор предметной области исследования — метода инвариантной корреляции и способах его реализации в оптических системах [1]. Для выполнения данной работы были реализованы 2 различных ИФ: ИФ с максимальной средней высотой корреляционного пика и оптимально-компромиссным соотношением (OT MACH) [1, 2] и ИФ с минимумом шума и энергии корреляции (MINACE) [1, 2]. Рассмотрены основные метрики качества корреляционного распознавания изображений и указан их главный недостаток — недостаточный анализ формы корреляционных сигналов. Предложено исследовать возможности использования свёрточных нейронных сетей (СНС) для анализа формы корреляционных сигналов.

Также представлен способ реализации метода инвариантной корреляции в оптических системах. Рассмотрены две основные схемы когерентных оптико-цифровых корреляторов: коррелятор с фильтрацией в плоскости пространственных частот (4-f коррелятор) и коррелятор совместного преобразования. Рассмотрены современные средства пространственно-временной модуляции лазерного излучения: жидкокристаллические (ЖК) пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) и микрозеркальные (МЗ) ПВМС. Описаны методы синтеза голографических фильтров (ГФ).

В параграфе 1.4 представлена исследуемая система распознавания изображений, блок-схема которой представлена на рисунке 1. Предложен следующий алгоритм работы системы: распознаваемое изображение передаётся в когерентный оптико-цифровой коррелятор, где с помощью заранее вычисленного ГФ рассчитывается корреляционный сигнал, кото-

рый фиксируется фотокамерой. Затем, полученный сигнал обрабатывается СНС, которая классифицирует корреляционный сигнал. При этом используется СНС, предварительно обученная на тренировочном наборе корреляционных сигналов.

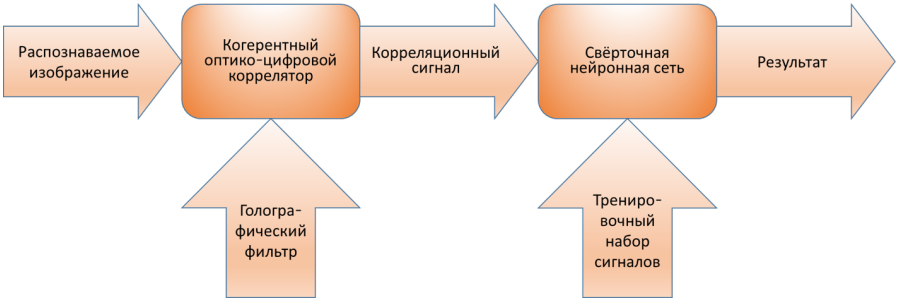


Рис. 1 — Блок-схема предлагаемой системы распознавания изображений.

Вторая глава представляет собой подробный обзор предметной области исследования — свёрточных нейронных сетей применительно к задачам классификации изображений. Описаны основные используемые слои СНС: свёрточный слой, полносвязный слой, батч-нормализация и пулинг. Представлен обзор различных функций активации, которые на сегодняшний день активно используются в различных архитектурах СНС. Среди рассмотренных функций активации выбраны и реализованы для дальнейшего использования следующие: относительно давно известная *Leaky ReLU* (2010 г.) [3], более новая *Swish* (2017 г.) [4] и новейшая *Mish* (конец 2019 г.) [5].

Рассмотрены способы обучения свёрточных нейронных сетей для решения задачи классификации изображений. Описан алгоритм обратного распространения ошибки. В качестве функции потерь выбрана функция перекрёстной энтропии, также для обучения СНС выбран адаптивный алгоритм обратного распространения ошибки Адам, поскольку он является наименее чувствительным к точной настройке гиперпараметров. Для снижения вероятности наступления эффекта переобучения принято решение использовать L_2-регуляризацию с коэффициентом $\lambda = 0{,}0005$, а также реализованы несколько алгоритмов аугментации изображений, в числе

которых случайная обрезка, зеркальные отображения, поворот изображения на случайный угол, масштабирование со случайным коэффициентом, эффект дефокусировки, случайное изменение яркости и контраста, добавление аддитивных и мультипликативных шумов, а также добавление шумов в виде случайных выбросов. Использование реализованных алгоритмов аугментации изображений позволило значительно снизить риск переобучения и увеличить способность СНС к обобщению.

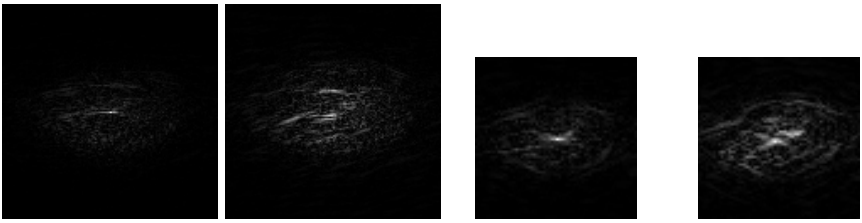
Реализованы основные метрики оценки качества нейронных сетей: точность, полнота и F-мера, которая выбрана в качестве решающей. Рассмотрены несколько классических архитектур свёрточных нейронных сетей. Особенности СНС ResNet [6] и GoogleNet [7] были изучены и использованы при проектировании собственной архитектуры СНС для классификации корреляционных сигналов.

Третья глава посвящена реализации свёрточной нейронной сети для классификации корреляционных сигналов.

В первую очередь, был подготовлен набор изображений, содержащий изображения истинных и ложных объектов интереса различного разрешения. Объекты интереса были расположены на различном фоне в условиях различного угла пространственного поворота относительно оси, проходящей перпендикулярно через центр объекта. Для полученного набора изображений был получен набор корреляционных сигналов с использованием ИФ ОТ МАСН. Всего было получено 7200 сигналов, примеры которых представлены на рисунке 2.

Предложен алгоритм предобработки изображений корреляционных сигналов для обучения СНС, который заключается в следующем. Из матрицы корреляционного сигнала вырезается центральная часть размером 32×32 и берётся её модуль. Затем производится нормировка полученной матрицы таким образом, чтобы её значения были распределены в интервале $[0, 1]$. Таким образом, при корреляционном распознавании изображений полностью решается проблема подбора порога распознавания изображений.

На языке программирования Python с использованием фреймворков глубокого обучения Tensorflow и Keras было реализовано и обучено 36 раз-



(а) (б) (в) (г)

Рис. 2 — Корреляционные сигналы: (а) — истинный класс, 128×128; (б) — ложный класс, 128×128; (в) — истинный класс, 64×64; (г) — ложный класс, 64×64.

личных архитектур СНС для классификации корреляционных сигналов. Лучшей архитектурой СНС показала себя *ResNet18* с функцией активации *Leaky ReLU* и функцией активации *Softmax* на выходе, с помощью которой удалось достичь следующих значений метрик на тестовом наборе корреляционных сигналов: точность — 93,6%, полнота — 92,91% и F-мера — 92,69%.

Эффективность обученной ResNet18 при классификации корреляционных сигналов была доказана во время тестирования: по сравнению с классическими метриками корреляционного распознавания, использование СНС позволило увеличить среднюю точность классификации тестовых изображений на 11%. Также, при тестировании обнаружено, что СНС, обученная на корреляционных сигналах, полученных от объектов одного типа, может с высокой точностью классифицировать корреляционные сигналы, полученные от объектов совершенно иного типа. Этот факт был доказан методом обратной постановки задачи.

Четвёртая глава посвящена численному и экспериментальному моделированию различных конфигураций оптического 4-f коррелятора.

В параграфе 4.1 рассматриваются особенности модуляции лазерного излучения при использовании амплитудных ЖК ПВМС. Установлено, что амплитудные ЖК ПВМС выполняют дополнительную фазовую модуляцию лазерного излучения, причём вносимый фазовый сдвиг зависит

от уровня амплитудного пропускания ПВМС. Была реализована интерферометрическая установка, с помощью которой была получена зависимость величины дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС от уровня пропускания. Полученная зависимость представлена на рисунке 3.

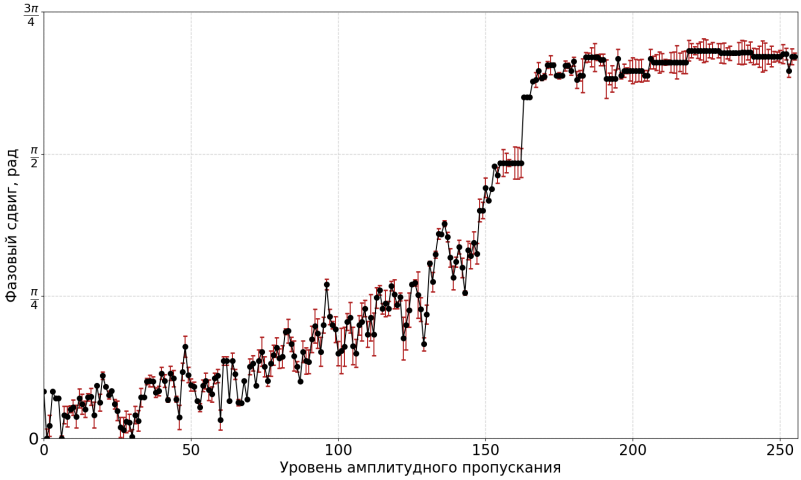


Рис. 3 — Зависимость дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС от уровня пропускания.

В параграфе 4.2 представлены результаты экспериментального восстановления голографических фильтров. Показано, что экспериментально восстановленные изображения имеют хорошее качество и визуально совпадают с изображениями, восстановленными численно. Доказана эффективность описанного в первой главе метода синтеза голографических фильтров.

Было выполнено моделирование работы реального амплитудного ЖК ПВМС в системе корреляционного распознавания изображений. При этом была использована измеренная зависимость величины дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС от уровня пропускания. Для моделирования такого случая изображения распознаваемые изображения изменялись по следующей формуле:

$$\mathbf{I}'(m,n) = \mathbf{I}(m,n) \cdot \exp\left(2\pi i \Phi(\mathbf{I}(m,n))\right), \tag{1}$$

где $\mathbf{I}(m,n)$ представляет собой элемент матрицы исходного изображения и $\Phi()$ представляет собой измеренную зависимость, представленную на рисунке 3. При выполнении моделирования было обнаружено, что дополнительная фазовая модуляция, вносимая амплитудным ЖК ПВМС, увеличивает среднюю вероятность ошибки классификации изображений с 2,393% до 16,47% по сравнению с «идеальным» случаем, в котором отсутствуют любые искажения. Для снижения негативного влияния присутствия дополнительной фазовой модуляции был предложен алгоритм оптимизации ИФ, который заключается в следующем. Изображения, из которых синтезируется ИФ, должны быть подвергнуты такому же преобразованию, как и распознаваемые изображения. Средняя вероятность ошибки классификации изображений при использовании оптимизации ИФ составила 4,567%.

Было показано, что при использовании фазовых ЖК ПВМС необходимо также использовать оптимизацию ИФ для улучшения результатов корреляционного распознавания. В данном случае, изображения подвергаются следующему преобразованию:

$$\mathbf{I}'(m,n) = \exp\left(i\frac{\chi}{255}\mathbf{I}(m,n)\right), \tag{2}$$

где χ представляет собой диапазон фазовой модуляции и 255 представляет собой максимальное значение амплитуды при использовании глубины цвета, равной 8 бит.

В параграфе 4.6 представлены резульаты моделирования четырёх различных конфигураций 4-f коррелятора, основанных на амплитудных и фазовых ЖК ПВМС. По результатам моделирования наибольшую точность показал коррелятор с амплитудным ЖК ПВМС в качестве устройства ввода распознаваемых изображений и фазовым ЖК ПВМС в качестве устройства ввода голографических фильтров. Также показано, что использование СНС для классификации корреляционных сигналов позволяет существенно повысить точность классификации изображений.

Средняя точность в представленной конфигурации коррелятора составила 83,7% при использовании метрики «отношение пик/энергия корреляции» и 91,6% при использовании СНС ResNet18. Отмечено, что средняя точность при использовании СНС ResNet18 превышает среднюю точность в «идеальной» конфигурации, полученной при использовании метрики «отношение пик/энергия корреляции» (88,5%).

В **пятой главе** представлены результаты нейросетевой обработки сигналов, полученных в реальных когерентных оптико-цифровых корреляторах, использующих бинарные средства модуляции.

В параграфе 5.1 представлены результаты нейросетевой обработки корреляционных сигналов, полученных в 4-f корреляторе [8]. Была использована база корреляционных сигналов, состоящая из 11 истинных сигналов и 3 ложных сигналов, полученных экспериментально. СНС ResNet18 была обучена на синтезированных корреляционных сигналах, полученных при использовании другого типа ИФ от изображений другого типа объектов. Показана эффективность использования СНС для классификации экспериментально полученных корреляционных сигналов. 8 из 11 объектов истинного класса классифицированы верно с определяемой СНС средней вероятностью 87,35%. 3 из 3 объектов ложного класса классифицированы верно со средней вероятностью 97,77%.

В параграфе 5.2 представлены результаты нейросетевой обработки корреляционных сигналов, полученных в корреляторе совместного преобразования. Для получения корреляционных сигналов был реализован коррелятор совместного преобразования, фотография реализованной установки представлена на рисунке 4.

В рамках эксперимента было получено по 3 корреляционных сигнала для истинного и ложного объектов следующим образом. Первый сигнал был получен полностью численно, второй — первый такт вычислений был выполнен экспериментально, а второй численно, третий — оба такта вычислений были выполнены экспериментально. Все полученные корреляционные отклики были классифицированы верно с вероятностями 92,76%, 87,64% и 60,64% для истинного объекта в трёх экспериментах соответственно и с вероятностями 99,06%, 99,76% и 97,31% для ложного объекта.

На рисунке 5 представлены изображения распределения интенсивности пространственных спектров (первый такт), а также изображения распределения интенсивности корреляционных сигналов (второй такт), полученные для истинного и ложного объектов экспериментально.

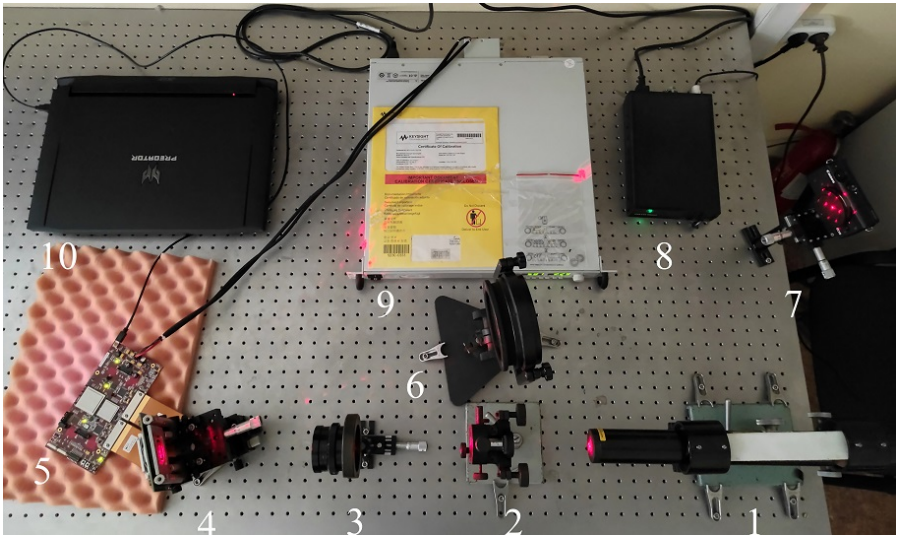
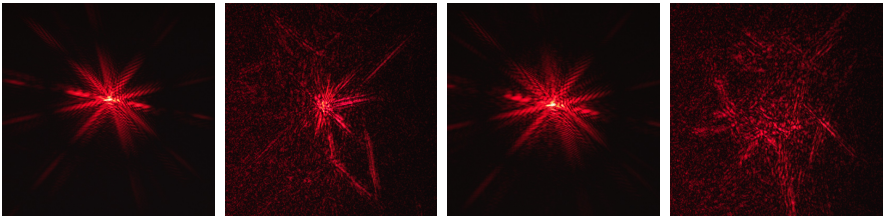


Рис. 4 — Фотография собранного макета когерентного оптико-цифрового коррелятора совместного преобразования.



(а) (б) (в) (г)

Рис. 5 — Совместный спектр (а) и корреляционный сигнал (б) истинного объекта, совместный спектр (в) и корреляционный сигнал (г) ложного объекта, полученные экспериментально.

Основные выводы работы

Диссертация посвящена разработке и экспериментальной апробации методов создания современной системы распознавания изображений, основанной на когерентном оптико-цифровом корреляторе с нейросетевой обработкой выходных сигналов. В результате проведённой работы были получены следующие основные результаты:

1. Предложена архитектура системы распознавания изображений на основе когерентного оптико-цифрового коррелятора и свёрточной нейронной сети, используемой в качестве постобработчика корреляционных сигналов. Выполнены численные и экспериментальные исследования возможности использования свёрточной нейронной сети для классификации корреляционных сигналов. Результаты исследований свидетельствуют о том, что способность обученной свёрточной нейронной сети к обобщению достаточна, чтобы правильно классифицировать корреляционные сигналы, которые по своей природе значительно отличаются от корреляционных сигналов, присутствовавших в тренировочной выборке свёрточной нейронной сети.

2. Исследованы и программно реализованы 36 различных архитектур свёрточных нейронных сетей, а также создано программное обеспечение, позволяющее в рамках задач данного исследования обучать нейронные сети, тестировать их и сохранять обученные модели для дальнейшего использования. Подготовлен набор изображений объектов интереса, включающий в себя 7200 полутоновых изображений с различным разрешением и фоном. При проведении компьютерных экспериментов по классификации корреляционных сигналов, точность классификации по F-мере корреляционных сигналов реализованными архитектурами свёрточных нейронных сетей составила от 85% до 93%. При этом, среди реализованных архитектур свёрточных нейронных сетей наиболее эффективной является ResNet18 с функцией активации Leaky ReLU и функцией активации Softmax на выходе. При классификации корреляционных сигналов тестового набора достигнуты точность 93,60%, полнота 92,91% и F-мера

92,69%. Компьютерные эксперименты с выбранной архитектурой свёрточной нейронной сети продемонстрировали:

- при нейросетевой обработке корреляционных сигналов не требуется решение проблемы подбора порога распознавания изображений;
- нейросетевая обработка корреляционных сигналов позволяет на порядок улучшить качество корреляционного распознавания изображений;
- свёрточная нейронная сеть, обученная на корреляционных сигналах, полученных с использованием одного типа инвариантного фильтра, может с высокой точностью классифицировать корреляционные сигналы, полученные с применением другого типа инвариантного фильтра;
- свёрточная нейронная сеть, обученная на корреляционных сигналах, полученных от объектов одного типа, может с высокой точностью классифицировать корреляционные сигналы, полученные от объектов совершенно иного типа.

3. Проведено математическое моделирование «идеальной» конфигурации коррелятора с фильтрацией в плоскости пространственных частот, такая конфигурация не учитывает характеристики и особенности модуляции реальных амплитудных и фазовых жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света. При моделировании использовались 42 набора тренировочных и тестовых изображений, в том числе заведомо обеспечивавших «наихудший» и «наилучший» случаи распознавания. Среднее качество распознавания для этих экспериментов составило 88,5% процентов при использовании метрики соотношение пик/энергия корреляции. Обработка свёрточной нейронной сетью ResNet18 позволила увеличить среднее качество распознавания до 97,6%.

4. Проведено экспериментальное исследование особенностей модуляции света, осуществляемой амплитудным жидкокристаллическим пространственно-временным модулятором света. При этом:

- создана интерферометрическая экспериментальная установка для измерения дополнительной фазовой модуляции, вносимой ам-

плитудным жидкокристаллическим пространственно-временным модулятором света;

- для обработки результатов экспериментов использованы фильтрация и нормализация полученных интерференционных картин;
- получена зависимость дополнительной фазовой модуляции серийного амплитудного жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света от устанавливаемого уровня амплитудного пропускания.

5. Выполнено моделирование функционирования амплитудного и фазового жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света в качестве устройств ввода распознаваемых изображений и голографических фильтров в когерентный коррелятор. Измеренная зависимость вносимой дополнительной фазовой модуляции амплитудного жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света от устанавливаемого уровня амплитудного пропускания была использована при выполнении моделирования. По результатам моделирования предложен метод оптимизации синтеза инвариантных фильтров, учитывающий особенности модуляции фазовых и амплитудных жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света. Использование предложенного метода оптимизации позволяет использовать модуляторы в оптической схеме коррелятора при незначительных — порядка 5% — потерях качества распознавания.

6. Выполнено математическое моделирование работы четырёх возможных конфигураций когерентного оптико-цифрового коррелятора с использованием амплитудных и фазовых жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света. По результатам моделирования сделан вывод, что коррелятор, использующий амплитудный жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света в качестве устройства ввода распознаваемых изображений и фазовый жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света в качестве устройства ввода голографических фильтров, является предпочтительным. Среднее качество распознавания изображений (для используемых в работе обучающих и тестовых наборов) в данной конфигурации соста-

вило 91,6% процентов при нейросетевой обработке корреляционных сигналов. Способность обученной свёрточной нейронной сети к обобщению позволила значительно приблизить качество распознавания во всех моделируемых конфигурациях корреляторов к качеству в «идеальной» конфигурации.

7. Выполнены эксперименты по реализации систем распознавания изображений на основе когерентных оптико-цифровых корреляторов двух основных типов, использующих бинарные средства пространственной модуляции света, и нейросетевой постобработки. В экспериментах при нейросетевой обработке сигналов оптических корреляторов использовалась нейронная сеть ResNet18, обученная ранее на используемых в работе тренировочных наборах корреляционных сигналов, полученных численно.

- Выполнена нейросетевая обработка корреляционных сигналов, зарегистрированных в когерентном оптико-цифровом корреляторе с фильтрацией в плоскости пространственных частот. 8 из 11 объектов истинного класса были классифицированы верно с определяемой нейронной сетью средней вероятностью 87,35%. 3 из 3 объектов ложного класса были классифицированы верно со средней вероятностью 97,77%.
- Реализована схема когерентного коррелятора совместного преобразования на основе микрозеркального пространственно-временного модулятора света. Проведены эксперименты с цифровой обработкой оптически зарегистрированных совместных спектров изображений и последующей классификацией рассчитанных корреляционных сигналов нейронной сетью ResNet18. Объект истинного класса классифицирован верно с вероятностью 87,64%, объект ложного класса классифицирован верно с вероятностью 99,76%. Проведены эксперименты с оптическими формированием и регистрацией корреляционных сигналов и их последующей классификацией нейронной сетью ResNet18. Предварительно регистрируемые совместные спектры подвергались адаптивной бинаризации с гауссовым окном. Объект истинного класса класси-

фицирован верно с вероятностью 60,64%, объект ложного класса классифицирован верно с вероятностью 97,31%.

Список использованных источников

1. *Kumar, B.V.K.V.* Correlation pattern recognition / B.V.K.V. Kumar, A. Mahalanobis, R.D. Juday. — Cambridge University Press, 2005.
2. *Kumar, B.V.K.V.* Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators / B.V.K.V. Kumar // *Applied Optics.* — 1992. — Vol. 31, no. 23. — Pp. 4773–4801.
3. *Nair, V.* Rectified linear units improve restricted boltzmann machines / V. Nair, G. Hinton // Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML-10). — 2010. — Pp. 807–814.
4. *Ramachandran, P.* Searching for activation functions / P. Ramachandran, B. Zoph, Q. Le // *arXiv preprint arXiv:1710.05941.* — 2017.
5. *Misra, D.* Mish: a self regularized non-monotonic neural activation function / D. Misra // *arXiv preprint arXiv:1908.08681.* — 2019.
6. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* — 2015. — Pp. 770–778.
7. Going deeper with convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia et al. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2015. — Pp. 1–9.
8. LPCC invariant correlation filters: realization in 4-f holographic correlator / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, S.A. Sirotkin et al. // Optical Pattern Recognition XIX / International Society for Optics and Photonics. — Vol. 6977. — 2008. — P. 69770C.

Список работ, в которых опубликованы основные положения диссертации

1. Measurement of additional phase modulation of an amplitude liquid crystal spatial light modulator HoloEye LC 2002 by dual-beam interferometric method / **D.S. Goncharov**, V.V. Krasnov, N.M. Ponomarev, R.S. Starikov // Practical Holography XXXII: Displays, Materials, and Applications / International Society for Optics and Photonics. — Vol. 10558. — 2018. — P. 105580Y.

2. The influence of additional phase modulation of an amplitude liquid crystal STLM on the image recognition characteristics in the invariant optical digital correlator / **D.S. Goncharov**, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov et al. // Computer Optics. — 2019. — Vol. 43, no. 2. — Pp. 200–208.

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, E.K. Petrova et al. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2019. — Vol. 46, no. 4. — Pp. 126–129.

4. Implementation of Fourier holograms using high-performance DMD SLM / **D.S. Goncharov**, R.S. Starikov, N.M. Ponomarev, D.Yu. Molodtsov // Procedia Computer Science. — 2020. — Vol. 169. — Pp. 558–563.

5. Implementation features of invariant optical correlator based on amplitude LC SLM / **D.S. Goncharov**, E.K. Petrova, N.M. Ponomarev et al. // Optical Memory and Neural Networks. — 2020. — Vol. 29, no. 2. — Pp. 110–117.

6. Особенности применения инвариантных корреляционных фильтров для распознавания цветных субпиксельных изображений / Е.К. Петрова, Р.С. Стариков, **Д.С. Гончаров** и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 8. С. 665–675.

Публикации в трудах конференции

1. Измерение характеристик фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС двухлучевым интерферометрическим методом / **Д.С. Гончаров**, В.В. Краснов, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2017. — Pp. 636–637.

2. Синтез и исследование инвариантного корреляционного фильтра с максимальной средней высотой корреляционного пика / **Д.С. Гончаров**, Е.К. Петрова, Н.М. Пономарев et al. // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2017. — Pp. 618–619.

3. Математическое моделирование работы инвариантного оптического коррелятора при наличии дополнительной фазовой модуляции амплитудного ПВМС / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2018. — Pp. 572–573.

4. Измерение профиля поверхности микрозеркального ПВМС интерферометрическим методом / **Д.С. Гончаров**, Д.Ю. Молодцов, Н.М. Пономарев et

al. // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2018. — Pp. 580–581.

5. Учет дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС при реализации голографических инвариантных корреляционных фильтров / **Д.С. Гончаров**, В.В. Краснов, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // XV Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. — 2018. — Pp. 320–323.

6. Влияние бинаризации инвариантных корреляционных фильтров с оптимизацией параметров на качество распознавания полутоновых изображений / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2018». — 2018. — Pp. 226–226.

7. Особенности реализации инвариантного оптического коррелятора на базе фазового пространственно-временного модулятора света / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2018». — 2018. — Pp. 238–239.

8. Особенности реализации голографических инвариантных корреляционных фильтров на базе фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света / **Д.С. Гончаров**, Е.Ю. Злоказов, Е.К. Петрова et al. // XVI Всероссийский молодежный самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике. — 2018. — Pp. 283–291.

9. Фазовый ПВМС как устройство ввода изображений в инвариантный оптико-цифровой коррелятор / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2019. — Pp. 261–262.

10. Исследование бинарного представления голограмм инвариантных корреляционных фильтров в задачах распознавания образов / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2019. — Pp. 281–282.

11. Синтез корреляционного фильтра МСЭК для распознавания субпиксельных изображений / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков et al. // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2019. — Pp. 721–722.

12. Особенности применения цветовых моделей при распознавании цветных изображений с использованием инвариантных корреляционных фильтров / **Д.С. Гончаров**, Е.К. Петрова, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2019. — Pp. 723–724.

13. Исследование методов синтеза корреляционных фильтров, инвариантных к освещенности сцены / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков et al. // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2019. — Pp. 725–726.

14. Реализация голограмм Фурье с использованием высокопроизводительного микрозеркального ПВМС / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // XVI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. — 2019. — Pp. 388–391.

15. Моделирование работы инвариантного оптико-цифрового коррелятора изображений с бинарным вводом данных / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков et al. // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2020. — Pp. 685–686.

16. Сравнение микрозеркального и фазового жидкокристаллического ПВМС как устройств ввода инвариантого оптико-цифрового коррелятора изображений / Н.Н. Евтихиев, **Д.С. Гончаров**, Е.Ю. Злоказов et al. // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2020. — Pp. 675–676.

17. Моделирование работы инвариантного корреляционного фильтра типа maximum margin / **Д.С. Гончаров**, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков, Н.А. Троценко // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2020. — Pp. 683–684.

18. Возможности использования цветовой информации для обнаружения и распознавания субпиксельных объектов в условиях зашумленности изображения / **Д.С. Гончаров**, Е.К. Петрова, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2020. — Pp. 693–694.

Препринты

1. Improving correlation method with convolutional neural networks / **D.S. Goncharov**, R.S. Starikov // arXiv preprint arXiv: 2004.09430. — 2020.

Гончаров Дмитрий Сергеевич
Когерентные оптико-цифровые корреляторы изображений с нейросетевой обработкой выходных сигналов.
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 _____